Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences | Science

**S C C S** | **C S A S**

**Secrétariat canadien de consultation scientifique** | **Canadian Science Advisory Secretariat**

**Document de recherche 2012/101** | **Research Document 2012/101**

**Région du Québec** | **Quebec Region**

# Modèle de simulation de stratégies de récolte applicable à la crevette nordique

# A model for simulating harvest strategies applicable to northern shrimp

Mathieu Desgagnés et/and Louise Savard

Direction régionale des Sciences / Regional Science Branch
Pêches et des Océans Canada / Fisheries and Oceans Canada
Institut Maurice-Lamontagne / Maurice Lamontagne Institute
850 route de la mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

This series documents the scientific basis for the evaluation of aquatic resources and ecosystems in Canada. As such, it addresses the issues of the day in the time frames required and the documents it contains are not intended as definitive statements on the subjects addressed but rather as progress reports on ongoing investigations.

Les documents de recherche sont publiés dans la langue officielle utilisée dans le manuscrit envoyé au Secrétariat.

Research documents are produced in the official language in which they are provided to the Secretariat.

Ce document est disponible sur l'Internet à: This document is available on the Internet at:
http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1499-3848 (Imprimé / Printed)
ISSN 1919-5044 (En ligne / Online)
© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2012
© Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2012
Canada

**La présente publication doit être citée comme suit :**

Desgagnés, M. et L. Savard. 2012. Modèle de simulation de stratégies de récolte applicable à la crevette nordique. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2012/101. ii + 52 p.

**Correct citation for this publication:**

Desgagnés, M. and L. Savard. 2012. A model for simulating harvest strategies applicable to northern shrimp. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/101. ii+ 52 p.

## RÉSUMÉ

Un modèle de simulation a été développé pour comparer la performance de règles d'ajustement des prélèvements de crevette nordique dans le nord du golfe du Saint-Laurent. Le modèle est adapté au cycle vital de la crevette en incluant un changement de sexe dépendant de la longueur. Le modèle a permis de simuler la dynamique observée d'un stock et de projeter sur 25 années la trajectoire de celui-ci. Le choix d'une relation stock-recrutement, la valeur assumée de mortalité naturelle ou l'incertitude sur la précocité du changement de sexe ont particulièrement influencé la trajectoire de la population. Par contre, l'utilisation de l'un ou l'autre de ces scénarios n'a pas modifié l'interprétation de la performance des différentes règles. Le modèle s'est avéré un outil efficace pour aider au choix d'une règle d'ajustement des prélèvements.

## ABSTRACT

A simulation model was developed for comparing the performance of adjustment rules for shrimp harvests in the northern Gulf of St. Lawrence. The model is adapted to the life cycle of the shrimp by including a sex change depending on the length. The model allowed simulation of the observed stock dynamic and to project the trajectory of it over 25 years. The choice of a stock-recruitment relationship, the assumed value of natural mortality and the uncertainty of the early sex change have particularly influenced the population trajectory. However, the use of either of these scenarios did not alter the interpretation of the performance of different rules. The model has proved to be an effective tool to assist in the selection of a harvest adjustment rule.

## INTRODUCTION

La crevette nordique (*Pandalus borealis*) est exploitée commercialement dans l'est canadien depuis les années 1960. Les débarquements ont augmenté régulièrement dans les années 1970 et 1980 et atteignaient près de 50 000 tonnes en 1996. L'abondance des stocks a augmenté rapidement durant la deuxième moitié des années 1990 et le début des années 2000 et les débarquements ont plus que triplé entre 1996 et 2008 pour atteindre près de 170 000 tonnes. Les statistiques préliminaires de 2011 indiquent des débarquements pour la côte Atlantique de près de 150 000 tonnes.

Les évaluations des stocks de crevette nordique de l'est canadien sont effectuées régulièrement (la fréquence des évaluations peut varier selon les stocks) et des recommandations sur le total admissible des captures (TAC) sont formulées pour chacune des zones de pêche. Des programmes de monitorage de la pêche et des relevés de chalutage permettent de récolter les données nécessaires au suivi de l'état des populations. En général, les évaluations consistent en des analyses descriptives de la tendance de quelques indicateurs et les TAC sont établis de façon empirique en se basant sur les niveaux de captures réalisées dans le passé.

Un atelier national sur le développement d'approches de précaution pour les pêches de crevette du Canada a été tenu en novembre 2008 et des points de référence provisoires ont été adoptés pour délimiter les zones de classification (saine, de prudence et critique) de l'état d'un stock (MPO 2009). Une revue par les pairs tenue le 2 novembre 2011 a examiné de nouveaux points de référence pour les stocks de crevette de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (MPO 2011a). L'indicateur principal basé sur l'abondance des mâles et des femelles estimée à partir de la pêche commerciale et du relevé de recherche (Savard 2012) permet de situer l'état du stock par rapport aux points de référence. Ces nouveaux points de référence seront utilisés pour définir une approche de précaution à la gestion

## INTRODUCTION

The northern shrimp (*Pandalus borealis*) has been fished commercially in Eastern Canada since the 1960s. Landings increased steadily during the 1970s and 80s and reached nearly 50,000 tons by 1996. Stock abundance then increased quickly through the second half of the 1990s and early 2000s and landings more than tripled between 1996 and 2008 to almost 170,000 tons. According to preliminary statistics, landings for the Atlantic coast totaled nearly 150,000 tons in 2011.

Northern shrimp stock assessments in Eastern Canada are conducted regularly (with assessment frequency varying depending on stocks) and recommendations are made on the total allowable catch (TAC) in each fishing area. Fishery monitoring programs and trawling surveys are used to collect the data required to monitor the status of populations. Assessments generally take the form of descriptive analyses of trends in certain indicators, and TACs are established empirically based on catch levels in previous years.

A national workshop on developing precautionary approaches for the Canadian shrimp fisheries was held in November 2008, where provisional reference points were adopted for delineating the classification zones (healthy, cautious and critical) for a stock's status (DFO 2009). At a peer review on November 2, 2011, new reference points were examined for shrimp stocks in the Estuary and Gulf of St. Lawrence (DFO 2011a). The main indicator, based on estimated male and female abundance using information from the commercial fishery and the research survey (Savard 2012), can be used to position the stock status in relation to the reference points. These new reference points will be used to define a precautionary

des stocks de crevette du golfe.

Bien que des points de référence soient utilisés dans le cadre des évaluations de stock, les règles de décision des TAC en fonction des zones saine, de prudence ou critique sont encore en discussion pour la plupart des pêcheries de crevette. En l'absence de règles de décision formelles, l'ajustement apporté au TAC est fait sur une base empirique. Par exemple, dans le cas des stocks de crevette du Golfe, le TAC était ajusté en fonction de l'état de la ressource de façon à ce que le taux d'exploitation qui serait généré par ce TAC demeure à un niveau similaire à celui de la moyenne à long terme (MPO 2011b). Toutefois, l'évaluation des stocks est descriptive et la méthode ne permet pas d'estimer un taux d'exploitation absolu, ni de le mettre en relation avec des taux d'exploitation cibles. Elle permet par contre de suivre les changements relatifs du taux d'exploitation au cours des années. Comme aucun effet négatif de l'exploitation sur les populations de crevette nordique n'a été perçu jusqu'à maintenant, il est postulé qu'un taux d'exploitation similaire au taux moyen est adéquat.

Le présent document décrit un modèle opérationnel développé pour comparer différentes règles d'ajustement du prélèvement et ainsi éclairer les discussions futures sur le choix de règles de décision du TAC. Pour incorporer l'incertitude relative aux données, à la structure du modèle ou aux fluctuations environnementales futures, douze scénarios sont explorés pour juger de la robustesse et de la performance des règles de décision étudiées.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### STRUCTURE DU MODÈLE OPÉRATIONNEL

Le modèle développé pour projeter l'évolution d'une population de crevettes porte sur des effectifs distribués en sept stades de maturité: un stade larve (*l*), 4 stades mâles (*m1* à *m4*) et 2 stades femelles (*f1* et *f2*). Les mâles sont groupés selon leur âge (de 1 an à 4 ans) et les

approach to managing Gulf shrimp stocks.

Although reference points are used as part of the stock assessment process, discussions are ongoing for most shrimp fisheries with regard to TAC decision rules based on whether a stock is classified as healthy, cautious or critical. In the absence of formal decision rules, the TAC is adjusted on an empirical basis. For shrimp stocks in the Gulf, for example, the TAC was adjusted based on the status of the resource so that the exploitation rate generated by the TAC would remain fairly close to the long term average (DFO 2011b). Since stock assessments are descriptive, however, this method cannot be used to estimate an absolute exploitation rate or to relate it to target exploitation rates. The method does, nonetheless, make it possible to track relative changes in the exploitation rate over the years. As no negative impact of exploitation on the northern shrimp has been detected to date, an exploitation rate similar to the average is deemed adequate.

This document outlines an operational model developed for comparing various harvest adjustment rules with a view to informing future discussions on defining TAC decision rules. To address any uncertainty concerning the data, the model structure or future environmental fluctuations, twelve scenarios are explored to gauge the robustness and performance of the decision rules under study.

## MATERIAL AND METHODS

### OPERATING MODEL STRUCTURE

The model developed to project the evolution of a shrimp stock is applied to population numbers distributed through seven stages of maturity: a larval stage (*l*), four male stages (*m1* to *m4*) and two female stages (*f1* and *f2*). Males are grouped by age (one to four years)

femelles selon qu'elles ont ou non déjà porté des œufs (primipares et multipares). Le modèle a un pas de temps annuel et une matrice de Leslie permet d'exprimer les équations qui caractérisent la dynamique du stock modélisé :

and females by whether they had already produced eggs (primiparous and multiparous). The model has an annual time step, and a Leslie matrix is used to express equations characterizing the dynamics of the modeled stock:

$$\begin{pmatrix} N_{i} \\ N_{m1} \\ N_{m2} \\ N_{m3} \\ N_{m4} \\ N_{f1} \\ N_{f2} \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f(n_{f1}) & f(n_{f2}) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_{it}(1-cs_{i}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_{it}(1-cs_{i}) & \phi_{it}(1-cs_{i}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_{it}(cs_{i}) & \phi_{it}(cs_{i}) & \phi_{it}(cs_{i}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{it} & \phi_{it} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_{i} \\ N_{m1} \\ N_{m2} \\ N_{m3} \\ N_{m4} \\ N_{f1} \\ N_{f2} \end{pmatrix}_{t}$$

où $N_i$ est le nombre d'individus de stade $i$, $cs_i$ est la proportion d'individus de stade $i$ qui changeront de sexe dans l'année en cours, $f(n_f)$ est la relation entre le nombre de reproducteurs et les recrues et $\Phi_{it}$ est la survie des individus de stade $i$ au temps $t$, déterminée tel que :

where $N_i$ is the number of individuals in stage $i$, $cs_i$ is the proportion of individuals in stage $i$ that will change sex during the current year, $f(n_f)$ is the relationship between numbers of spawners and of recruits and $\Phi_{it}$ is the survival of stage $i$ individuals over time $t$, calculated such that:

$$\phi_{it} = e^{\left(-\left(M_t + F_t * s_i^{comm}\right)\right)}$$

où $M$ et $F$ sont les mortalités naturelles et dues à la pêche et $s_i^{comm}$ est la sélectivité des engins de pêche commerciale pour les individus de stade $i$.

where $M$ is natural mortality, $F$ fishing mortality and $s_i^{comm}$ the selectivity of commercial fishing gear for stage $i$ individuals.

Dans le modèle, les mâles de 2 ans (*m2*) sont considérés comme les recrues et leur nombre est estimé par une relation entre le stock reproducteur et les recrues. L'inclusion des stades *I* et *m1* dans le modèle reproduit le délai entre l'éclosion et le recrutement. Les stades *m4* et *f2* regroupent respectivement les mâles de 4 ans et plus et les femelles de 2 ans et plus. À partir du stade *m2*, un mâle peut changer de sexe pour devenir une femelle primipare (*f1*).

In the model, two-year-old males (*m2*) were classified as recruits and their number is estimated by a relationship between spawning stock and recruits. Stages *I* and *m1* are included in the model to represent the time period between hatching and recruitment. Stages *m4* and *f2* represent males aged 4+ and females aged 2+ respectively. Beginning in stage *m2*, males may change sex to become primiparous females (*f1*).

Le modèle permet de calculer un premier indicateur de l'état du stock soit le taux de capture de la pêche commerciale :

The model is used to calculate an initial indicator of the stock status in the form of the commercial fishery catch rate:

$$I_{i,t}^{comm} = q_{comm} N_{i,t}$$

où $q_{comm}$ est la capturabilité commerciale.

Le modèle permet aussi de calculer un second indicateur de l'état du stock soit une estimation de la biomasse issue d'un relevé scientifique :

where $q_{comm}$ is commercial catchability.

The model is also used to calculate a second stock status indicator in the form of estimated biomass from a research survey:

$$I_{i,t}^{rel} = q_{rel} N_{i,t} e^{\left(-\frac{M_i + F_t * s_i^{comm}}{2}\right)} s_i^{rel}$$

où $q_{rel}$ est la capturabilité du relevé et $s_i^{rel}$ est la sélectivité des engins de pêche du relevé pour les individus de stade *i*. La mortalité instantanée totale est divisée par 2 pour représenter un relevé qui aurait lieu en milieu d'année.

where $q_{rel}$ is the survey catchability and $s_i^{rel}$ is the selectivity of survey fishing gear for stage *i* individuals. Total instantaneous mortality is divided by 2 to represent surveys taking place mid-year.

Les simulations du modèle sont initiées en reproduisant les 21 années (1990 à 2010) de données de la pêche et du relevé de la zone de pêche à la crevette Sept-Îles du golfe du Saint-Laurent (Savard 2011, Savard et Bourdages, 2011). La série des recrutements estimée à partir des distributions de fréquences de taille du relevé fournit un recrutement supposé exact pour cette période. Simultanément, les captures réelles sont imposées au modèle. À partir de l'année 22, une relation entre le stock reproducteur et les recrues prend le relais et les prélèvements sont fixés selon une règle prédéfinie. Les effectifs présents à l'an 1 sont déterminés à partir des distributions de fréquences de taille de relevé de 1990 ajusté pour la sélectivité de l'engin (Tableau 1). Un total de 1 001 projections a été effectué, chacune pour une durée fixée à 25 ans.

Model simulations are initiated by reproducing the 21 years (1990 to 2010) of fishery and survey data from the Sept-Îles shrimp fishing area in the Gulf of St. Lawrence (Savard 2011, Savard and Bourdages 2011). The recruitment series estimated from the survey size frequency distribution provides an estimate of recruitment for this time period that is assumed exact. Simultaneously, the actual catches are imposed on the model. Beginning in year 22, a relationship between spawning stock and recruits is used instead, and harvests are set according to a predefined rule. Population numbers for year 1 are determined from the 1990 survey size frequency distribution adjusted for gear selectivity (Table 1). A total of 1,001 projections were performed, each for a fixed 25-year duration.

Le prélèvement par la pêche est exprimé en poids et la mortalité instantanée due à la pêche ($F_t$) est ajustée à chaque pas de temps pour produire les prélèvements attendus. La valeur maximale autorisée pour *F* dans le présent exercice est de 3, ce qui nécessite un effort approximativement 2,5 fois supérieur au maximum observé entre 1990 et 2010 pour la zone de pêche Sept-Îles.

Fishery removal is expressed as weight, and instantaneous fishing mortality ($F_t$) is adjusted for each time step to produce expected removal values. The maximum allowed value of *F* in this exercise is 3, which would require effort approximately 2.5 times the maximum observed between 1990 and 2010 in the Sept-Îles fishing area.

## PARAMÈTRES DU MODÈLE

Les paramètres du modèle sont présentés au Tableau 1. Les valeurs utilisées pour chacun des paramètres sont également présentées au Tableau 1 et sont décrites dans les sections suivantes.

### Mortalité naturelle

La mortalité naturelle est considérée constante pour les stades recrues et post-recrues et a été fixée à 0,8 pour les cinq premières années du modèle (an 1 à an 5) et à 0,5 par la suite. Ces valeurs s'apparentent à celles obtenues par Fréchette et Labonté (1981) pour le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent. La diminution de la mortalité naturelle après cinq ans améliore l'ajustement des données prédites par le modèle aux données observées et permet d'inclure des changements dans la prédation dû au déclin des stocks de morue et de sébaste.

### Fécondité

Nous formulons l'hypothèse que l'abondance des mâles ne limite pas la reproduction et que le regroupement des femelles primipares et multipares peut être considéré comme le stock reproducteur. La relation entre la taille des femelles et le nombre d'œufs produits est :

$$Fec = a_f \cdot L^{b_f}$$

où $L$ est la taille de la femelle (Tableau 1). La relation provient d'un échantillonnage printanier de la zone de pêche Sept-Îles dans le golfe du Saint-Laurent (Savard, données non-publiées).

### Croissance

Dans le modèle, la taille d'un individu influence sa contribution au poids de la capture, sa disponibilité aux engins de pêche et sa probabilité de changer de sexe. Les distributions de fréquence de taille des mâles du relevé de recherche de 1990 à 2010 ont été analysées par un modèle de densité mélange fini (Finite Mixture Distribution Models) développé dans le logiciel MIX et traduit dans le package « *mixdist* »

## PARAMETERS OF THE MODEL

Model parameters are presented in Table 1. The values used for each parameter are also set out in Table 1 and described in the following paragraphs.

### Natural mortality

Natural mortality was deemed constant for the recruit and post-recruit stages at 0.8 for the first five years of the model (year 1 to year 5) and at 0.5 for subsequent years. These values are similar to those found by Fréchette and Labonté (1981) for the north-west Gulf of Saint-Lawrence. The decrease in natural mortality after five years improves the fit of the model-predicted data to the observed data and allows the incorporation of changes in predation due to a decline in cod and redfish stocks.

### Fecundity

We make the assumption that male abundance do not limit reproduction and that the grouping of primiparous and multiparous females may be considered as the spawning stock. The relationship between female size and number of eggs produced is:

where $L$ is female size (Table 1). This relationship is based on spring sampling in the Sept-Îles fishing area in the Gulf of St. Lawrence (Savard, unpublished data).

### Growth

In the model, an individual's size influences its contribution to catch weight, availability to fishing gear and probability of changing sex. Male size frequency distributions from the research survey of 1990 to 2010 were analyzed using a finite mixture distribution model developed in the MIX application and translated to the *mixdist* package (Macdonald 2010) for the R environment (R Development

(Macdonald 2010) pour le logiciel R (R Development Core Team 2010). L'ajustement est réalisé annuellement suivant une distribution normale avec les contraintes de quatre modes et d'un coefficient de variation constant (Figure 1).

Core Team 2010). The adjustment is done annually following a normal distribution with constraints of four modes and a constant coefficient of variation (Figure 1).

**Taille par stade**

La taille moyenne annuelle des mâles, telle que calculée par l'adaptation en langage R du logiciel MIX, a été utilisée pour ajuster une courbe de croissance de von Bertalanffy :

**Size by stage**

The mean annual size of males as calculated for adaptation into the R language of the MIX application is used to fit a von Bertalanffy growth curve:

$$L_i = L_\infty \cdot \left(1 - e^{-K \cdot (t - t_0)}\right) + \varepsilon$$

où $L_i$ est la taille moyenne du stade $i$, $L_\infty$ est la longueur individuelle asymptotique des crevettes mâles, $t_0$ est l'âge hypothétique auquel la taille est nulle, $K$ est le coefficient de croissance métabolique et $\varepsilon$ est un terme d'erreur de distribution normale. La taille moyenne de chacun des deux stades de femelles est estimée par la moyenne des tailles annuelles moyennes (Figure 2).

where $L_i$ is the mean stage $i$ size, $L_\infty$ the asymptotic length of male individuals, $t_0$ the hypothetical age at which size is nil, $K$ the metabolic growth coefficient and $\varepsilon$ a normal distribution error term. The mean size of each of the two female stages was estimated using the average of mean annual size values (Figure 2).

**Relation poids-longueur**

Le poids en grammes d'un individu est prédit selon sa taille suivant la relation poids-longueur de la zone de pêche de Sept-Îles (Savard et Bourdages 2011). La relation est de la forme :

**Weight-length relationship**

The weight per individual in grams is predicted based on size following the weight-length relationship applicable to the Sept-Îles fishing area (Savard and Bourdages 2011). This relationship is as follows:

$$w_i = a_p L_i^{b_p}$$

où $L_i$ est la longueur du céphalothorax en millimètres d'un individu de stade $i$.

where $L_i$ is the cephalothorax length in millimeters of a stage $i$ individual.

**Changement de sexe**

Au cours de leur vie, les crevettes nordiques mâles changent de sexe pour devenir des femelles. Nous utilisons l'hypothèse d'un changement de sexe en fonction de la taille des individus. La proportion d'individus d'un stade $i$ qui change de sexe est :

**Sex change**

Male northern shrimp change sex during their lifetime to become females. The sex change is assumed to be based on individual size. The proportion of individuals in stage $i$ that changes sex is:

$$cs_i = \frac{1}{1+e^{-2\frac{\log(3)}{SR_{sex}}(l_i - L50_{sex})}}$$

où $L50_{sex}$ représente la longueur où 50 % des mâles changent de sexe, $l_i$ est la longueur moyenne d'un mâle de stade $i$, et $SR_{sex}$ est la différence entre la longueur où 75 % des mâles changent de sexe et celle où 25 % des mâles changent de sexe. Les valeurs utilisées pour les paramètres $L50_{sex}$ et $SR_{sex}$ proviennent de Drouineau *et al.* (2012) (Figure 3).

where $L50_{sex}$ is the length at which 50% of males change sex, $l_i$ the mean length of stage $i$ males and $SR_{sex}$ the difference between the length at which 75% of males change sex and that at which 25% of males change sex. The values used for parameters $L50_{sex}$ and $SR_{sex}$ were taken from Drouineau et al. (2012) (Figure 3).

**Capturabilité**

La capturabilité du relevé est fixée à 1 et la capturabilité commerciale ($q_{comm}$) est estimée à partir des années 1 à 21 des simulations :

**Catchability**

Survey catchability is set at 1, and commercial catchability ($q_{comm}$) is estimated based on simulation years 1 to 21:

$$q_{comm} = \frac{1}{21}\sum_{t=1}^{21} \frac{\frac{\sum_{i\in(f1,f2)} C_{t,i}}{E_t}}{\sum_{i\in(f1,f2)} N_{t,i}}$$

où $E_t$ est l'effort de pêche en heures à l'année $t$ et $C_{ti}$ sont les captures en tonnes à l'année $t$ du stade $i$, tel que :

where $E_t$ is fishing effort in hours for year $t$ and $C_{ti}$ the catch in tons for year $t$ and stage $i$, such that:

$$C_{t,i} = \frac{F_t * s_i}{M_t + F_t * s_i} N_{t,i}(1 - e^{(-(M_t + F_t * s_i))}) * \frac{w_i}{1000000}$$

**Sélectivité**

La sélectivité des engins de pêche est fixée à 1 pour les stades *f1* et *f2*, tant pour la pêche commerciale que pour le relevé. Pour les stades mâles, la sélectivité est calculée par :

**Selectivity**

Fishing gear selectivity is 1 for stages *f1* and *f2* for both the commercial fishery and the survey. Selectivity for male stages is calculated as:

$$s_i = \frac{1}{1+e^{-2\frac{\log(3)}{SR}(l_i - L50)}}$$

où $L50$ représente la longueur où 50 % des

where $L50$ is the length at which 50% of

individus sont retenus par l'engin, $l_i$ est la longueur moyenne au stade *i*, et *SR* est la différence entre la longueur où 75 % des individus sont retenus et celle où 25 % des individus sont retenus. La valeur de *L50* du relevé ($L50_{rel}$) est estimée en ajustant le modèle de simulation aux observations de biomasse des femelles, tous les autres paramètres étant fixés. La valeur des paramètres de la pêche commerciale ($L50_{comm}$ *et* $SR_{comm}$) et le *SR* pour le relevé ($SR_{rel}$) proviennent de Drouineau *et al.* (2012) (Figure 4).

## RELATION STOCK RECRUTEMENT

Pour déterminer une relation entre le stock et les recrues, nous avons utilisé le nombre d'œufs produits selon le nombre et la taille des femelles estimées par les relevés annuels de recherche. Le nombre d'individus nouvellement recrutés au stock (stade *m2*) est estimé à partir de l'analyse modale (Figure 1). Plusieurs modèles ont été étudiés pour décrire la relation entre la composante reproductrice du stock et le recrutement (Tableau 2, Figure 5). Chacun des modèles a été ajusté par maximum de vraisemblance selon trois distributions des résidus, soit log-normale, normale et gamma (se référer à Needle (2002) et Simmonds *et al.* (2011) pour plus de détails sur les différents modèles). Le critère de vraisemblance d'Akaike (Akaike 1974) est utilisé pour comparer les modèles (Tableau 3). Lors des simulations, la variabilité de l'effectif au recrutement est reproduite par un échantillonnage des résidus de l'ajustement.

## RÈGLES DE DÉCISION DU TAC

Savard (2012) décrit comment les informations issues des données commerciales et des relevés scientifiques sont combinées pour obtenir un indice de l'état des stocks de crevette du nord du Golfe du Saint-Laurent. Pour les besoins des simulations, une version modifiée pour inclure une erreur d'observation est utilisée:

individuals are retained by the gear, $l_i$ the mean length in stage *i* and *SR* the difference between the length at which 75% of individuals are retained and that at which 25% of individuals are retained. The value of *L50* from the survey ($L50_{rel}$) is estimated by fitting the simulation model to observations of female biomass, all other parameters remaining fixed. The values of the commercial fishery parameters ($L50_{comm}$ *and* $SR_{comm}$) and survey *SR* ($SR_{rel}$) are taken from Drouineau et al. (2012) (Figure 4).

## STOCK RECRUITMENT RELATIONSHIP

To determine the relationship between the stock and recruits, we used the number of eggs produced based on the estimated number and size of females according to the annual research surveys. The number of individuals newly recruited to the stock (stage *m2*) is estimated from the modal analysis (Figure 1). Multiple models were studied to describe the relationship between the spawning component of the stock and the recruitment (Table 2, Figure 5). Maximum likelihood analysis was used to fit each of the models based on three scenarios for residual distribution: log-normal, normal and gamma (see Needle [2002] and Simmons et al. [2011] for details on the various models). Akaike's information criterion (Akaike 1974) was used to compare the models (Table 3). Variability in recruitment numbers during the simulations was reproduced through sampling of residuals from the fit.

## HARVEST DECISION RULES

Savard (2012) describes the manner in which information obtained from commercial data and research surveys is combined to produce an index of the status of northern shrimp stocks in the Gulf of St. Lawrence. For simulation needs, a modified version to account for observation error is used:

$$I_t^{tot} = \frac{I_{m,t}^{comm} + I_{f,t}^{comm} + I_{m,t}^{rel} + I_{f,t}^{rel}}{4} + \varepsilon_t$$

où $I_{m,t}^{comm}$ et $I_{f,t}^{comm}$ représentent un indice standardisé commercial (nombre par unité d'effort) au temps *t* pour les stades mâles et stades femelles, $I_{m,t}^{rel}$ et $I_{f,t}^{rel}$ représentent un indice standardisé du relevé (nombre total estimé) au temps *t* pour les stades mâles et stades les femelles, et $\varepsilon_t$ est une erreur d'observation normalement distribuée. La standardisation des indices est réalisée sur la moyenne des dix premières années (correspondant aux années d'observation 1990 à 1999).

where $I_{m,t}^{comm}$ and $I_{f,t}^{comm}$ are standardized commercial indices (number per unit effort) over time *t* for the male and female stages, $I_{m,t}^{rel}$ and $I_{f,t}^{rel}$ standardized survey indices (estimated total number) over time *t* for the male and female stages and $\varepsilon_t$ a normally distributed observation error. The indices are standardized over the mean of the first 10 years (corresponding to observation years 1990 to 1999).

Des lignes directrices s'appuyant ou non sur l'état de la ressource relativement aux points de référence sont utilisées pour déterminer les captures commerciales permises pour l'année suivante. Trois règles pour déterminer un TAC sont mises à l'essai pour illustrer le modèle. La première règle (*A*) n'est pas influencée par l'indice de l'état du stock en maintenant le prélèvement annuel à 22 000 tonnes (TAC constant). La seconde règle (*B*) augmente le TAC proportionnellement à l'indice de l'état du stock, tel que :

Guidelines depending or not on the status of the resource in relation to the reference points are used to determine the allowable commercial catch for the following year. Three rules for determining the TAC are tested to illustrate the model. The first rule (*A*) is not influenced by the stock status index and maintains the annual harvest at 22 000 tons (constant TAC). The second rule (*B*) increases the TAC proportionally to the stock status index such that:

$$TAC = I_t^{tot} * Y$$

où *Y* est une valeur de capture de référence fixée à 10 000. Cette règle s'apparente au maintien d'un taux d'exploitation constant. La troisième règle (*C*) est une modification de la seconde pour rendre celle-ci conforme à une approche de précaution. La règle est décrite par :

where *Y* is a reference catch value of 10,000. This rule is similar to maintaining a constant exploitation rate. The third rule (*C*) is a modified version of the second rule to make it consistent with a precautionary approach. The rule is as follows:

$$TAC = \begin{cases} 0 & \text{si / if : } I_t^{tot} \le b_{\lim} \\ \dfrac{I_t^{tot} - b_{\lim}}{b_{\sup} - b_{\lim}} * Y & \text{si / if : } b_{\lim} < I_t^{tot} \le b_{\sup} \\ I_t^{tot} * Y & \text{si / if : } I_t^{tot} > b_{\sup} \end{cases}$$

Ainsi, l'intensité de l'exploitation est modifiée

Exploitation intensity was adjusted to the

selon la zone où se trouve le stock (critique, de prudence ou saine). La valeur de référence utilisée est fixée à 10 000 et les valeurs des points de référence utilisées sont de 0,56 pour le point de référence limite ($b_{lim}$) et 1,35 pour le point de référence supérieur ($b_{sup}$).

## ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Pour décrire l'impact du choix des valeurs des paramètres sur les résultats des simulations, une analyse de sensibilité est réalisée. Cet exercice permet de moduler l'importance à accorder à l'incertitude accompagnant ces paramètres lors de l'analyse des résultats. Cette sensibilité est évaluée en considérant un cas de base et en modifiant certains paramètres clés individuellement. L'interaction possible entre ces paramètres n'est toutefois pas prise en compte. Le seul paramètre libre dans les analyses de sensibilité est la sélectivité du chalut du relevé de recherche pour le stade de recrutement (*m2*) (voir section Sélectivité).

Le scénario de base (*Base*) correspond à la formulation des paramètres telle que présentée au tableau 1 et à une relation stock-recrutement de type Hockey stick ajustée suivant une distribution normale (Tableau 4). En plus du scénario de base, les scénarios suivants sont testés :

- deux alternatives à la relation stock-recrutement : une première de type Saila-Lorda suivant une distribution normale (*SL-n*) et une deuxième de type Ricker suivant une distribution log-normale (*Ric-ln*);
- une sous-estimation de l'erreur d'observation, soit un cv de 0.2 (*CV+*);
- une sous-estimation et une surestimation de la mortalité naturelle, soit une valeur de M plus élevée (multipliée par 2, *M+*) ou plus faible (divisée par 2, *M-*);
- une sous-estimation et une surestimation de la taille au changement de sexe, soit une valeur plus élevée (*CS+*) ou plus faible (*CS-*) de 3 millimètres;
- une sous-estimation et une surestimation du

stock's status zone (critical, cautious or healthy). The reference value used is 10,000, while the reference point values used are 0.56 for the limit reference point ($b_{lim}$) and 1.35 for the upper stock reference point ($b_{sup}$).

## SENSITIVITY ANALYSIS

A sensitivity analysis is conducted to describe the impact of the choice of parameter values on the simulation outcomes. This allows for adjustment of the importance assigned to the uncertainty associated with these parameters during analysis of the results. This sensitivity is evaluated by starting with a base case and then modifying certain key parameters one by one. However, potential interactions between these parameters are not taken into account. The only free parameter in these sensitivity analyses is trawl selectivity in the research survey for the recruitment stage (*m2*) (see section on Selectivity).

Parameters for the base scenario (*Base*) are formulated as set out in Table 1 and using an adjusted hockey stick stock-recruitment relationship following a normal distribution (Table 4). In addition to the base scenario, the following scenarios are tested:

- two variants of the stock-recruitment relationship: a first one of the type Saila-Lorda following a normal distribution (*SL-n*) and a second one of the type Ricker following a log-normal distribution (*Ric-ln*);
- an underestimation of the observation error, i.e. a cv of 0.2 (*CV+*);
- an underestimation and an overestimation of the natural mortality, i.e. an higher M value (multiplied by 2, *M+*) and a lower value (divided by 2, *M-*);
- an underestimation and an overestimation of the size at sex change, either higher (*CS+*) or lower (*CS-*) by 3 millimeters;
- an underestimation and an overestimation

taux de croissance soit une valeur augmentée de 50 %(*K+*) ou diminuée de 50%(*K-*). Pour ces deux scénarios, les valeurs de $L_{inf}$ et de $t_0$ ont été adaptées pour optimiser l'ajustement aux longueurs moyennes à l'âge;
- l'imposition d'une série de mauvais (0 individu recruté) recrutement (*MC*) pour trois années consécutives aux années de simulation 27 à 29 et
- l'augmentation graduelle de la mortalité naturelle sur la période de projection pour qu'elle soit 60 % plus élevée à la fin qu'au début (*Pred*).

Le seul paramètre libre dans les analyses de sensibilité est la sélectivité du chalut du relevé de recherche pour le stade *m2*. Les courbes de sélectivité retenues pour chaque scénario (Figure 4) présentent une sélectivité pour le stade *m2* variant de 5,0 à 31,6 %. Plusieurs scénarios partagent la même courbe de sélectivité. Il s'agit du scénario de base (*Base*), de ceux utilisant une relation stock-recrutement alternative (*SL-n* et *Ric-ln*), de celui supposant une sous-estimation de la variabilité de l'erreur d'observation (*CV+*), de celui infligeant un épisode de très faible recrutement (*MR*) et de celui augmentant graduellement la mortalité naturelle (*Pred*). La courbe de sélectivité utilisée avec un scénario est conservée pour toutes les règles de décision étudiées avec ce même scénario.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### RELATION STOCK-RECRUTEMENT

L'analyse des distributions de fréquence de taille des mâles du relevé à l'aide de l'application «*mixdist*» pour R est à la base de l'estimation d'un nombre important de paramètres clés notamment la relation stock-recrutement et la croissance pour les stades m1 à m4, et par conséquent, la taille et le poids par stade ainsi que les effectifs de la première année (Tableau 1). Cependant, comme le modèle de densité mélange fini est appliqué sur les données de chaque année indépendamment, il serait souhaitable de faire un suivi de la progression

of the growth rate, either higher by 50% (*K+*) or lower by 50% (*K-*). For these two scenarios, $L_{inf}$ and $t_0$ values were adapted to optimize the fit to the mean lengths at age;
- the imposition of a series of poor (0 individual recruited) recruitment (*MC*) for three consecutive years in simulation years 27 to 29; and
- a gradual increase in natural mortality over the projection period to reach a value 60% higher at end than at start (*Pred*).

The only free parameter in the sensitivity analyses is the research survey trawl selectivity for stage *m2*. The selectivity curves used for each scenario (Figure 4) depict selectivity for stage *m2* ranging between 5.0 and 31.6%. Several scenarios share the same selectivity curve. These include the base scenario (*Base*) as well as the scenarios involving variants of the stock-recruitment relationship (*SL-n* and *Ric-ln*), underestimated variability of the observation error (*CV+*), assumption of very poor recruitment (*MR*) and a gradual increase in natural mortality (*Pred*). The selectivity curve used for any scenario remained the same for all decision rule studies relating to that scenario.

## RESULTS AND DISCUSSION

### STOCK RECRUITMENT RELATIONSHIP

Analysis of male size frequency distributions from the survey using the *mixdist* package for R forms the basis of estimates of a significant number of key parameters, including the stock-recruitment relationship and growth in stages m1 through m4 as well as, by extension, size and weight by stage and first-year population numbers (Table 1). However, since the finite mixture distribution model is applied to the data for each year independently, cohort tracking through the years should ideally be monitored to ensure

des cohortes à travers les années pour s'assurer que la taille moyenne des modes d'une année soit compatible avec la taille attendue aux années suivantes étant donné la croissance des cohortes. Ce suivi pourrait aussi aider à vérifier si l'hypothèse des 4 modes de mâles est plus appropriée qu'une hypothèse à 3 ou 5 modes.

On observe à la figure 1 que le premier mode est généralement bien distinct des autres modes, réduisant la possibilité d'erreur dans son estimation. Cependant, les individus correspondant à ce mode sont très petits et leur représentation dans les captures est fonction non seulement de leur abondance, mais aussi de leur taille. En effet, la très faible sélectivité des engins de pêche pour ces longueurs laisse croire que la représentation de ces individus dans les captures est soumise à un effet annuel imprévisible et non-souhaitable. D'autre part, les troisièmes et quatrièmes modes sont souvent confondus et leur représentation dans les captures dépend de l'importance des mâles qui ont déjà changé de sexe. Le deuxième mode apparaît donc comme celui qui correspond à l'estimation la plus fiable de l'abondance d'une cohorte. Ce mode a donc été utilisé comme indice du recrutement à la population.

Sept modèles avec trois types de distribution des résidus ont été examinés pour décrire la relation entre la production en œufs du stock au temps *t* (abondance des femelles multipliée par la fécondité individuelle) et le recrutement à la population au temps *t+3* (abondance des mâles de 2 ans) (Tableau 2, Figure 5). Le critère de vraisemblance utilisé pour juger de l'ajustement d'un modèle aux données indique que les meilleurs ajustements correspondent aux modèles Saila-Lorda, Ricker et Hockey stick (Tableau 3).

Un examen préliminaire des résultats de simulation a montré que pour la simulation de stratégies de récolte, il était suffisant de s'en tenir aux relations stock-recrutement les plus plausibles (MPO 2011c). Le cas de base qui servira de référence auxquels seront comparés

that the average size of the modes for any given year remains compatible with the anticipated size for subsequent years based on cohort growth. Monitoring could also enable confirmation of the appropriateness of assuming four male modes as opposed to three or five.

As illustrated in Figure 1, the first mode is generally quite distinct from the others, decreasing the probability of an error in its estimation. However, the individuals associated with this mode are very small, and their representation in catches is based on not only their abundance but also their size. Indeed, the very low fishing gear selectivity for these lengths suggests that the representation of these individuals in catches is subject to an unpredictable and undesirable year effect. On the other hand, the third and fourth modes are easily confused, and their representation in catches depends on the number of males that have already changed sex. The second mode consequently appears to be the one that corresponds to the most reliable estimate of cohort abundance. As a result, this mode is used as the population recruitment index.

Seven models with three residual distribution types were studied to describe the relationship between the stock's egg production at time *t* (female abundance multiplied by individual fecundity) and recruitment to the population at time *t+3* (abundance of 2+ males) (Table 2, Figure 5). According to the likelihood criterion used to gauge the fit of data models, the best fits were associated with the Saila-Lorda, Ricker and hockey stick models (Table 3).

Based on preliminary study of the simulation outcomes, it was sufficient for the purposes of the harvesting strategy simulations to focus on the most plausible stock-recruitment relationships (DFO 2011c). The base case serving as a reference for comparison of the

les différents scénarios correspond à une relation stock-recrutement de type Hockey stick avec une distribution normale des résidus. En effet, un modèle de type Hockey stick est couramment utilisée pour décrire une relation stock-recrutement dans les simulations de stratégies de récolte. La seconde relation de type Saila-Lorda avec une distribution normale des résidus a été choisie pour son critère de vraisemblance plus petit et pour l'importante différence dans la forme de la courbe comparée au cas de base. La troisième relation de type Ricker a été choisie car il s'agit du meilleur ajustement d'une distribution log-normale, avec un critère de vraisemblance assez près de celui du cas de base. Même s'il ne s'agit pas d'un des meilleurs ajustements, l'analyse de sensibilité avec cette relation est jugée importante car une distribution des résidus log-normale est considérée plus fréquemment pour décrire une relation stock-recrutement qu'une distribution normale. Ces trois types de relation stock-recrutement constituent donc une bonne représentation de la diversité des ajustements obtenus.

## AJUSTEMENT DU MODÈLE AUX DONNÉES OBSERVÉES

Les figures 6 à 8 présentent des projections de la biomasse femelle pour chaque combinaison de scénarios et règles de décision du TAC. Les valeurs de la biomasse des femelles du relevé des années 1 à 21 (1990 à 2010) y sont ajoutées pour permettent d'apprécier l'ajustement du modèle aux données observées.

L'ajustement du modèle aux données observées semble adéquat et rien ne suggère que le modèle échoue à capturer l'évolution de la population. Un seul paramètre est libre de varier lors de l'optimisation de l'ajustement, ce qui laisse croire que d'autres combinaisons de valeurs pour les paramètres fixes pourraient amener un ajustement différent aux observations. Toutefois, l'approche actuelle est justifiée par le besoin de comparer des règles de décision entre elles et non pas de déterminer précisément les effectifs d'un stock. Par conséquent, étant donné la

various scenarios corresponds to a hockey stick stock-recruitment relationship with normal residual distribution. Hockey stick models are widely used in this regard to describe the stock-recruitment relationship in harvesting strategy simulations. The second (Saila-Lorda) relationship with normal residual distribution was selected for its smaller likelihood criterion and the significant difference in the curve shape in comparison to the base case. The third (Ricker) relationship was selected because it displayed the best fit of a log-normal distribution with a likelihood criterion similar to that for the base case. Although the fit was not the most optimal, the sensitivity analysis with this relationship was deemed important since log-normal residual distribution is used more frequently than normal distribution to describe the stock-recruitment relationship. These three stock-recruitment relationship types consequently provide sound representation of the diversity of the resulting fits.

## MODEL FIT TO THE OBSERVED DATA

Figures 6 to 8 illustrate projections of female biomass for each combination of scenarios and TAC decision rules. The survey values for female biomass for years 1 through 21 (1990 to 2010) were incorporated to enable the evaluation of the model fit to the observed data.

The model fit to the observed data appears adequate without any indication of the model's failure to capture the evolution of the population. Only one parameter is free to vary during the optimization of the fit which could indicate that other combinations of the fixed parameters could conceivably provide a different fit to the observations. However, the current approach was justified by the requirement to compare decision rules with one another rather than to determine exact stock numbers. In light of its structure, the

structure du modèle, il n'est pas possible de l'utiliser pour déterminer un taux d'exploitation absolu ou une mortalité par la pêche cible.

La détermination de la courbe de sélectivité du chalut du relevé par l'optimisation du modèle vise à mettre à l'échelle le recrutement de manière à incorporer dans la dynamique de la population un nombre suffisant d'individus pour rendre compte de la biomasse observée et des débarquements enregistrés. La décision d'utiliser les observations des femelles du relevé pour évaluer l'ajustement du modèle est motivée par le fait que les femelles sont facilement identifiables et d'une taille suffisante pour être bien représentés dans le chalut. Les données commerciales n'ont pas été utilisées pour ajuster le modèle à cause de la difficulté à décrire le ciblage de certaines composantes de la population.

Pour obtenir un ajustement satisfaisant du modèle à la biomasse femelle observée, la mortalité naturelle instantanée des années 1 à 5 (1990 à 1994) a été maintenue de 60 % plus élevée que celle des années subséquentes. Cette modification rend compte du changement de la prédation causée par l'effondrement des stocks de poisson de fonds ayant mené à un moratoire sur la pêche à la morue en 1994 et au sébaste en 1995, deux prédateurs de la crevette (Savenkoff *et al.* 2006).

## SENSIBILITÉ DES PROJECTIONS À LA PARAMÉTRISATION DU MODÈLE

Les figures 6 à 8 présentent 50 des 1 001 projections sur 25 ans de la biomasse femelle estimée pour chaque combinaison de scénarios et règles de décision du TAC. La valeur médiane des 1 001 projections est également indiquée. Les résultats aux figures 9 à 14 sont présentés sous forme de boîtes à moustache indiquant la médiane des 1 001 projections, les quartiles, les valeurs contenues à l'intérieur de 1,5 fois l'écart interquartile et les valeurs extrêmes. Toutes ces figures permettent de vérifier la sensibilité du modèle en comparant la performance des trois règles de décision du TAC entre elles. D'autre

model consequently cannot be used to determine an absolute exploitation rate or target fishing mortality.

The determination of the survey trawl selectivity curve through the model optimization is to scale recruitment so as to incorporate into the population dynamics a number of individuals that is high enough to provide information on the observed biomass and recorded landings. The decision to use observations concerning the survey females to assess the model fit was based on the fact that females are easily identifiable and large enough to ensure significant representation in the trawl. Commercial data were not used to fit the model due to the difficulty of describing the targeting of some components of the population.

To achieve a satisfactory fit of the model to the observed female biomass, instantaneous natural mortality for years 1 to 5 (1990 to 1994) was maintained at 60% higher than in subsequent years. This modification addresses the change in predation caused by the collapse of groundfish stocks leading to a fishing moratorium on cod in 1994 and redfish in 1995, both being shrimp predators (Savenkoff et al. 2006).

## SENSITIVITY OF PROJECTIONS TO MODEL PARAMETERIZATION

Figures 6 to 8 illustrate 50 of the 1,001 projections over 25 years of the estimated female biomass for each combination of scenarios and TAC decision rules. The median value of the 1,001 projections is also shown. The results in Figures 9 to 14 are presented in the form of box-whisker plots indicating the median of 1001 projections, quartiles, values within 1.5 times the inter-quartile range and extremes values. All of these figures serve to verify the sensitivity of the model through comparison of the performance of the TAC decision rules with

part, certains des scénarios offrent la possibilité d'évaluer la sensibilité du modèle à des paramètres difficilement mesurables comme la mortalité naturelle et le coefficient de variation de l'erreur sur l'indice de l'état du stock, ou encore pour lesquels peu de résultats probants sont disponibles comme la taille au changement de sexe. La description des trois règles de décision du TAC et des 12 scénarios est présentée aux sections Règles de décision du TAC et Analyse de sensibilité.

Les figures 6 à 8 montrent qu'en comparant les résultats à ceux du cas de base, quatre scénarios ont très peu d'impact sur la trajectoire de la biomasse moyenne des femelles. Il s'agit du scénario simulant une sous-estimation de l'erreur d'observation de l'indice de l'état du stock (*CV+*), de celui simulant un changement de sexe tardif (*CS+*) et de ceux simulant une surestimation et une sous-estimation du taux de croissance (*K-* et *K+*). Le modèle est donc peu sensible à ces quatre paramètres et leur variation n'entraîne pas de changements dans l'interprétation de la performance des règles d'ajustement du TAC (Figures 9 à 14). En effet, peu importe l'indicateur examiné, la performance des règles l'une par rapport à l'autre demeure la même.

Par contre, le modèle est sensible aux paramètres de la relation stock-recrutement (*SL-n* et *RIC-n*), de la mortalité naturelle (*M-*, *M+*, *MR* et *Pred*) et du changement de sexe hâtif (*SC-*) (Figures 6 à 8). Tous ces paramètres ont une incidence sur les effectifs et donc sur l'impact du prélèvement sur la trajectoire de la biomasse femelle. La relation stock-recrutement détermine le nombre de recrues qui est injecté chaque année dans le système étant donné l'abondance des femelles alors que la mortalité naturelle a une incidence sur la survie des individus. Le changement de sexe hâtif a pour conséquence d'amener plus d'effectifs à la composante femelle et donc au stock reproducteur pour une année donnée. Les règles d'ajustement de la récolte peuvent donc avoir des impacts différents selon les hypothèses étudiées et il convient de tenir

one another. On the other hand, some scenarios provide an opportunity to assess the model's sensitivity to parameters not easily measured, such as natural mortality or the coefficient of variation of error in the stock status index, or for which limited conclusive results are available, such as size at sex change. For descriptions of the three TAC decision rules and the 12 scenarios, see the Harvest Decision Rules and Sensitivity Analysis sections.

Figures 6 to 8 show that in comparing the outcomes with those of the base case, four scenarios have very little impact on the trajectory of mean female biomass. These scenarios are those simulating an underestimated observation error concerning the stock status index (*CV+*), late sex change (*CS+*) and overestimated and underestimated growth rates (*K-* and *K+* respectively). The model is consequently not highly sensitive to these four parameters, variations in which do not lead to any changes in interpretation of the performance of TAC adjustment rules (Figures 9 to 14). Indeed, the performance of rules in relation to one another remains consistent regardless of the indicator examined.

On the other hand, the model was sensitive to parameters relating to the stock-recruitment relationship (*SL-n* and *RIC-n*), natural mortality (*M-*, *M+*, *MR* and *Pred*) and early sex change (*SC-*) (Figures 6 to 8). All of these parameters have an influence on population numbers and, consequently, on the impact of removal on the trajectory of the female biomass. The stock-recruitment relationship determines the number of recruits introduced to the system each year based on female abundance, while natural mortality influences the individual survival. Early sex change consequently increases numbers within the female component and, as a result, of spawning stock in any given year. The impact of harvest adjustment rules may consequently vary depending on the

compte des incertitudes sur ces paramètres clés lors de la simulation de l'impact de règles de décision.

## PERFORMANCE DES RÈGLES DE DÉCISION

Les figures 9 et 10 comparent les différentes combinaisons scénario-règle quant à la proportion du temps passé en zone saine et critique, respectivement. Le pourcentage du temps correspond au nombre total d'années où l'état du stock est situé dans la zone en question, divisé par la durée totale d'une projection, soit 25 ans. La biomasse femelle moyenne pour les années 22 à 46 obtenue selon chaque combinaison règle-scénario est comparée à la figure 11. Le débarquement moyen comparé à la figure 12 se décrit comme la moyenne des débarquements annuels pour les années de simulation 22 à 46. Les variations annuelles du TAC et des débarquements sont présentées aux figures 13 et 14. Il s'agit de la moyenne des différences en valeur absolue entre le TAC ou le débarquement d'une année et celui de la suivante, pour la période de projection (années 22 à 46).

D'une façon générale, la performance des règles n'est pas modifiée par les scénarios considérés. Par exemple, la trajectoire de la biomasse femelle se maintient en moyenne à un niveau plus élevé avec une règle conforme à une approche de précaution (règle C) quel que soit le scénario considéré (Figures 6 à 8 et 11). Le stock se maintient en zone saine dans une proportion du temps plus grande et en zone critique, dans une proportion du temps plus petite avec la règle conforme à une approche de précaution (Figures 9 et 10). D'autre part, l'incertitude associée aux résultats des simulations est en général plus faible avec la règle C.

Les variations interannuelles du TAC sont plus élevées avec une règle conforme à l'approche de précaution (Figure 13). Ceci s'explique par le fait que la règle prévoit des changements de TAC plus importants lorsque le stock est en zone de

assumption studied, and it is important to incorporate uncertainties relating to these key parameters into simulations of the impact of decision rules.

## PERFORMANCE OF DECISION RULES

Figures 9 and 10 compare the various scenario-rule combinations with respect to the proportion of time spent in the healthy and critical zones respectively. The percentage of time corresponds to the total number of years spent by the stock in a particular zone divided by the total projection duration of 25 years. The mean female biomass for years 22 through 46 resulting from each rule-scenario combination is compared in Figure 11. The mean landing used for comparison in Figure 12 represented the mean of annual landings for simulation years 22 to 46. Annual variations in TAC and landings are depicted in Figures 13 and 14. These values are the mean of the differences in absolute values between the TAC or landing of a given year and the next over the projection period (years 22 to 46).

In general, the scenarios considered do not change the performance of the rules. For example, the trajectory of the female biomass remains at a higher level on average with a rule consistent with a precautionary approach (rule C) regardless of the scenario under consideration (Figures 6 to 8 and 11). The stock stays in the healthy zone for a greater proportion of time and in the critical zone for a lesser proportion of time with the rule consistent with a precautionary approach (Figures 9 and 10). The uncertainty associated with the simulation outcomes is also generally less with rule C.

Interannual variations in TAC are higher with a rule consistent with the precautionary approach (Figure 13). This is explained by the fact that the rule provides for greater changes in TAC when the stock is in the

prudence. Les variations des débarquements entre les années sont donc plus importantes avec la règle C (Figure 14). Par contre, le débarquement cumulé sur 25 ans est sensiblement le même avec les règles B (taux d'exploitation constant) et C (conforme à une approche de précaution) (Figure 12).

Ce type de résultats illustre bien les informations dont les intervenants de la pêche doivent tenir compte lorsqu'ils doivent évaluer les avantages et inconvénients de différentes stratégies de récolte. En effet, les indicateurs de performance montrent bien que pour des débarquements cumulés similaires, une règle qui induit des variations interannuelles plus importantes permet cependant de maintenir une biomasse femelle plus élevée ce qui se traduit habituellement pour les exploitants par des taux de capture plus élevés. Les indicateurs se révèlent donc être un outil intéressant pour aider à la prise de décision quant au choix d'une règle relativement à d'autres.

## CONCLUSIONS

Même en l'absence de modèle analytique pour évaluer les effectifs absolus d'une population, un modèle opérationnel du type de celui qui est présenté ici permet d'évaluer la performance et la robustesse de stratégies de récolte de façon relative mais objective. Le modèle opérationnel adapté à la dynamique d'un stock de crevette nordique a réussi à capturer l'évolution d'une population-modèle et a permis de tester plusieurs hypothèses sur la dynamique du stock. Le modèle peut donc être considéré comme un outil puissant pour simuler la trajectoire d'un stock et évaluer les risques et incertitudes dans un contexte d'évaluation de stratégies de gestion.

cautious zone. Interannual variations in landings are consequently greater with rule C (Figure 14). However, cumulative landings over 25 years are more or less the same with rules B (constant exploitation rate) and C (consistent with the precautionary approach) (Figure 12).

Outcomes of this nature clearly illustrate the information which should be taken into account by the fishery stakeholders when they evaluate the advantages and disadvantages of various harvesting strategies. Indeed, the performance indicators clearly show that for similar cumulative landings, a rule resulting in greater interannual variations permits however to maintain higher female biomass, which typically translates into higher catch rates for harvesters. These indicators consequently prove useful as tools to assist in making the decision to follow one rule over others.

## CONCLUSIONS

Even in the absence of analytical models for assessing a population in terms of absolute numbers, an operational model such as that presented here can be used to evaluate the performance and robustness of harvesting strategies in a relative, yet objective, manner. The operational model adapted to the dynamics of a northern shrimp stock successfully captured the evolution of a model population and supported the testing of multiple assumptions on stock dynamics. The model can consequently be viewed as a powerful tool for simulating stock trajectory and assessing risks and uncertainties as part of evaluation of management strategies.

## UTILISATION DU MODÈLE POUR LA PÊCHE À LA CREVETTE DE L'ESTUAIRE ET DU GOLFE DU SAINT-LAURENT

Le Canada, en tant que signataire de l'Accord des Nations Unies sur la conservation et gestion des stocks de poissons chevauchants et des stocks de poissons grands migrateurs s'est engagé à appliquer l'approche de précaution à la gestion des stocks. Pour être conformes à l'approche de précaution, les plans de gestion des pêches doivent inclure des stratégies d'exploitation qui intègrent un point de référence limite à la démarcation entre la zone de classification de l'état d'un stock critique et la zone de prudence et un point de référence supérieur à la démarcation entre la zone de prudence et la zone saine ainsi qu'un taux d'exploitation de référence qui définit le niveau maximal de prises dans la zone saine.

Une revue par les pairs tenue le 2 novembre 2011 a examiné des points de référence qui délimitent les zones de classification (saine, de prudence et critique) de l'état des stocks de crevette de l'Estuaire et du Golfe (MPO 2011a). Les points de référence sont basés sur l'abondance des mâles et des femelles estimée à partir de la pêche commerciale et du relevé de recherche. Ces points de référence ont été utilisés pour définir une approche de précaution à la gestion des stocks de crevette qui a été présentée à un atelier sur la crevette du golfe à la fin novembre 2011 auquel participaient des intervenants de différents secteurs de la pêcherie. Le Comité Consultatif de la Crevette du Golfe (CCCG) tenu en février 2012, a examiné le cadre pour l'implantation d'une approche de précaution pour les saisons de pêche 2012 et 2013. Le CCCG a recommandé l'utilisation des points de référence pour déterminer les zones de classification de l'état des stocks ainsi que l'utilisation de lignes directrices pour le prélèvement et d'une règle de décision du TAC.

Le modèle opérationnel a été utilisé pour simuler

## THE USE OF THE MODEL FOR THE ESTUARY AND GULF OF ST. LAWRENCE FISHERY

As a signatory of the United Nations Agreement on Straddling and Highly Migratory Fish Stocks, Canada has committed to using the precautionary approach in managing its stocks. To be consistent with the precautionary approach, fisheries management plans must include harvesting strategies that include a limit reference point at the critical and cautious stock status classification zone boundary, and an upper stock reference point at the cautious and healthy zone boundary as well as a removal reference which defines the maximum catch level in the healthy zone.

A peer review conducted on November 2, 2011 examined the reference points delineating the various stock status classification zones (healthy, cautious and critical) for the Estuary and the Gulf (DFO 2011a). The reference points are based on estimated male and female abundance using information from the commercial fishery and the research survey. These reference points were used to define a precautionary approach to managing shrimp stocks that was presented at a workshop on Gulf shrimp held in late November 2011 at which stakeholders from various fishery sectors attended. The Gulf Shrimp Advisory Committee (GSAC) met in February 2012 to study the framework for adoption of a precautionary approach for the 2012 and 2013 fishing seasons. The GSAC recommended using the reference points to define the stock status classification zones as well as following harvest guidelines and a TAC decision rule.

The operational model was used to simulate

des règles de décision afin d'aider l'Industrie à faire des choix éclairés quant aux stratégies de récolte. Des lignes directrices pour un prélèvement ont été établies en étant basées sur la relation observée entre l'indicateur principal de l'état du stock d'une année et le prélèvement de l'année suivante (Savard 2012). Une modulation de cette relation en fonction des zones de classification de l'état des stocks a permis de la rendre conforme à une approche de précaution (MPO 2012). Le taux de prélèvement quand le stock est dans la zone saine correspond à un taux d'exploitation constant. Le taux de prélèvement diminue en zone de prudence jusqu'à la zone critique où il est constant à une valeur quatre fois inférieure à celle de la zone saine. Ces lignes directrices ont servi à l'élaboration de règles de décision pour déterminer des TAC annuels.

Treize règles de décision (Annexe 1) et cinq scénarios portant sur des hypothèses sur la dynamique du stock ont été testés à l'aide du modèle opérationnel. Les résultats des simulations qui ont été présentées à l'industrie de la crevette sont présentés aux annexes 2 à 7.Les simulations ont servi à comparer d'une part, la méthode informelle qui était utilisée auparavant avec des règles conformes à une approche de précaution. D'autre part, les simulations ont servi à comparer diverses approches pour tamponner les variations de la récolte entre les années. Outre le cas de base, une relation stock-recrutement de type Saila-Lorda, un changement de sexe hâtif, un mauvais recrutement pour trois années consécutives et une augmentation graduelle de la mortalité naturelle constituent les cinq scénarios étudiés.


## REMERCIEMENTS

Merci à Yvan Lambert pour ses judicieux commentaires.


decision rules to assist the industry in making informed choices concerning harvesting strategies. Harvest guidelines were established based on the relationship observed between the main stock status indicator for one year and the harvest for the following year (Savard 2012). A modulation of this relationship according to the different stock status zones made it consistent with a precautionary approach (DFO 2012). The removal rate when the stock is in the healthy zone represents a constant exploitation rate. The removal rate decreases through the cautious zone until the critical zone where it is kept constant to a value corresponding to one-fourth of the rate in the healthy zone. These guidelines were used in developing decision rules for setting annual TAC values.

The operational model enabled testing of 13 decision rules (Appendix 1) and five scenarios involving assumptions about stock dynamics. The simulation outcomes that were presented to the shrimp industry are documented in Appendices 2 to 7. On the one hand, the simulations enabled comparison of the informal method used previously with rules consistent with a precautionary approach. On the other hand, the simulations enabled comparison of various approaches for buffering interannual harvest variations. In addition to the base case, the five scenarios studied included a Saila-Lorda stock-recruitment relationship, premature sex change, poor recruitment for three consecutive years and a gradual increase in natural mortality.


## ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to Yvan Lambert for his judicious comments.

## RÉFÉRENCES REFERENCES


Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. Automatic Control, IEEE Transactions, vol.19, no.6, 716- 723.

Beverton R. J. H. and S. J. Holt. 1957. On the dynamics of exploited fish populations. Fishery Investigations, London, Series II, 19; 533 p.

Butterworth D. S. and M. O. Bergh. 1993. The development of a management procedure for the South African anchovy resource. Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences 120:87-99.

Cushing D. H. 1971. The Dependence of Recruitment on Parent Stock in Different Groups of Fishes. ICES J. Mar. Sci. 33: 340-362.

DFO 2009. Proceedings of the precautionary Approach Workshop on Shrimp and Prawn Stocks and Fisheries; November 26-27, 2008. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2008/031.

DFO 2011a. Reference points consistent with the precautionary approach for northern shrimp in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. DFO Can. Sci. Advis. Sec., Sci. Advis. Rep. 2011/062.

DFO 2011b. Assessment of shrimp stocks in the Estuary and Gulf of St. Lawrence in 2010. DFO Can. Sci. Advis. Sec., Sci. Advis. Rep. 2011/006.

DFO 2011c. Regional Science Advisory Process on the Precautionary approach reference points and Total Allowable Catch (TAC) adjustments rules for Northern Gulf of St. Lawrence shrimps (*Pandalus borealis*) Stocks; November 2, 2011. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Proceed. Ser. 2011/059.

DFO 2012. Assessment of Shrimp Stocks in the Estuary and Gulf of St. Lawrence in 2011. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2012/006.

Drouineau, H., Savard, L., Desgagnés, M., et Duplisea, D. 2012. SPAM (Sex-structured Pandalus Assessment Model): a stock assessment model for Pandalus stocks. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic sciences. 69:770-783.

Frechette, J., and S. Labonte. 1981. Biomass estimate, Year-class abundanceand mortality rates of Pandalus borealis in the N.-0. Gulf of St. Lawrence since 1974. Proceedings, International Pandalid Shrimp Symposium, Kodiak,Alaska, February, 1979.

Iles T. C. 1994. A review of stock–recruitment relationships with reference to flatfish populations. Netherlands Journal of Sea Research. 32:399-420.

Macdonald, P. 2010. mixdist: Finite Mixture Distribution Models. R package version 0.5-3. http://CRAN.R-project.org/package=mixdist

MPO 2009. Compte rendu de l'atelier sur l'approche de précaution pour les stocks et pêcheries

canadiens de crevette; 26-27 novembre 2008. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Compte rendu 2008/031.

MPO 2011a. Points de référence conformes à l'approche de précaution pour la crevette nordique de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2011/062.

MPO 2011b. Évaluation des stocks de crevette de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent en 2010. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2011/006.

MPO 2011c. Processus consultatif scientifique régional portant sur les points de référence et règles d'ajustement du total autorisé des captures (TAC) conformes à une approche de précaution pour les stocks de crevette nordique (Pandalus borealis) du nord du golfe du Saint-Laurent; 2 novembre 2011. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Compte rendu 2011/059.

MPO 2012. Évaluation des stocks de crevette de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent en 2011. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2012/006.

Myers R. A., N. J. Barrowman, J. A. Hutchings and A. Rosenberg. 1995. Population dynamics of exploited fish stocks at low population levels. Science. 269:1106-1108.

Needle C. L. 2002. Recruitment models: diagnosis and prognosis. Reviews in Fish Biology and Fisheries. 11:95-111.

R Development Core Team. 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.

Ricker W. 1954. Stock and recruitment. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 11:559-623.

Savard, L. 2011. Captures, effort et captures par unité d'effort de la pêche commerciale à la crevette nordique de l'estuaire et du nord du golfe du Saint-Laurent entre 1982 et 2010. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2011/032. iv + 49 p.

*Savard, L. 2011. Catches, effort and catches per unit of effort of the northern shrimp commercial fishery in the Estuary and the northern Gulf of St. Lawrence from 1982 to 2010. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/032. iv + 49 p.*

Savard, L. 2012. Indicateurs de l'état des stocks et points de référence conformes à une approche de précaution pour la crevette nordique du golfe du Saint-Laurent. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2012/006. ii + 29 p.

*Savard, L. 2012. Stock status indicators and reference points consistent with a precautionary approach for northern shrimp in the Gulf of St. Lawrence. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/006. ii + 29 p.*

Savard, L. et H. Bourdages. 2011. Mise à jour de l'estimation de biomasse et d'abondance de la crevette nordique (*Pandalus borealis*) à partir du relevé de chalutage dans l'estuaire et le nord du golfe du Saint-Laurent en 2010. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech.

2011/043. iv + 30 p.

*Savard, L. and H. Bourdages. 2011. Update of the estimation of northern shrimp (Pandalus borealis) biomass and abundance from the trawl survey in the Estuary and the northern Gulf of St. Lawrence in 2010. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/043. iv + 30 p.*

Savenkoff, C., L. Savard, B. Morin, and D. Chabot. 2006. Main prey and predators of northern shrimp (*Pandalus borealis*) in the northern Gulf of St. Lawrence during the mid-1980s, mid-1990s, and early 2000s. Can.Tech.Rep.Fish.Aquat.Sci. 2639: v+28 pp.

Shepherd J. G. 1982. A versatile new stock–recruitment relationship for fisheries and the construction of sustainable yield curves. J. Cons. int. Explor. Mer. 40:67-75.

Simmonds E. J., A. Campbell, D. Skagen, B. A. Roel, and K. Ciaran. 2011. Development of a stock–recruit model for simulating stock dynamics for uncertain situations: the example of Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) ICES J. Mar. Sci. 68: 848-859.

*Tableau/Table.1* *Paramètres du modèle /Parameters of the model.*

| Paramètre / Parameter | Valeur / Value | Source |
|---|---|---|
| *Mortalité naturelle / Natural mortality* | | |
| Année / Year 1 à/to 5 | 0.8 | Fixé / Fixed |
| Année / Year 6+ | 0.5 | Fixé / Fixed |
| *Fécondité / Fecundity* | | |
| $a_f$ | 0.05194 | Observations |
| $b_f$ | 3.13891 | Observations |
| *Croissance / Growth* | | |
| K | 0.377 | Analyse modale / Modal analysis |
| $L_{inf}$ | 25.99 | Analyse modale / Modal analysis |
| $t_0$ | 0.0997 | Analyse modale / Modal analysis |
| *Taille par stade / Size by stage* | | |
| l | 0 | Fixé / Fixed |
| m1 | 10.68 | Analyse modale / Modal analysis |
| m2 | 15.49 | Analyse modale / Modal analysis |
| m3 | 18.74 | Analyse modale / Modal analysis |
| m4 | 20.95 | Analyse modale / Modal analysis |
| f1 | 25.18 | Observations |
| f2 | 25.95 | Observations |
| *Relation poids-longueur / Weight-length relationship* | | |
| $a_p$ | 0.000735 | Observations |
| $b_p$ | 2.92 | Observations |
| *Changement de sexe / Sex change* | | |
| $L50_{sex}$ | 17.8 | Drouineau *et al.* (2012) |
| $SR_{sex}$ | 3.82 | Drouineau *et al.* (2012) |
| *Capturabilité / Catchability* | | |
| $q_{rel}$ | 1 | Fixé / Fixed |
| $q_{comm}$ | 3.94e-08 | Modèle / Model |
| *Sélectivité des chaluts commerciaux / Commercial trawl selectivity* | | |
| $L50_{comm}$ | 19.8 | Drouineau *et al.* (2012) |
| $SR_{comm}$ | 3.80 | Drouineau *et al.* (2012) |
| *Sélectivité du relevé / Survey selectivity* | | |
| $L50_{rel}$ | 17.94 | Modèle / Model |
| $SR_{rel}$ | 3.12 | Drouineau *et al.* (2012) |
| *Coefficient de variation de l'indice d'abondance* | | |
| CV | 0.05 | Fixé / Fixed |
| *Effectifs de la première année / Numbers of the first year* | | |
| l | 1.12e10 | Observations |
| m1 | 1.56e10 | Observations |
| m2 | 1.94e9 | Observations |
| m3 | 1.15e4 | Observations |
| m4 | 2.20e9 | Observations |
| f1 | 9.59e8 | Observations |
| f2 | 7.73e8 | Observations |

*Tableau 2. Modèles utilisés dans l'évaluation de la relation entre le stock reproducteur et les recrues.*
*Table 2. Models used in the assessment of the stock-recruitment relationship.*

| Type de modèle / Model type | Référence / Reference | Équation / Equation |
|---|---|---|
| *Recrutement asymptotique à biomasse élevée / Asymptotic recruitment at high biomass* | | |
| Beverton-Holt | Beverton and Holt (1957) | $r = aS/(b+S)$ |
| Beverton-Holt sigmoïde | Myers *et al.* (1995) | $r = aS^g/(b+S^g)$ |
| Hockey stick | Butterworth and Bergh (1993) | $r = \begin{cases} aS/b & S < b \\ a & S \geq b \end{cases}$ si |
| Puissance | Cushing (1971) | $r = aS^b$ si $b \geq 0$ |
| *Recrutement diminuant à biomasse élevée (forme de dôme) / Recruitment decreasing at high biomass (dome shape)* | | |
| Ricker | Ricker (1954) | $r = aSe^{(-bS)}$ |
| Shepherd | Shepherd (1982) | $r = aS^g/[1+(S/b)^g]$ |
| Saila-Lorda | Iles (1994) | $r = aS^g e^{(-bS)}$ |

*Tableau 3. Estimations des paramètres des modèles décrivant la relation entre le stock reproducteur et les recrues. Le paramètre β est utilisé pour les distributions gamma alors que le paramètre σ est utilisé pour les deux autres distributions. AIC : critère de vraisemblance d'Akaike.*

*Table 3. Estimates of the parameter models describing the relationship between the spawning stock and the recruits. The parameter β is used for the gamma distribution while the parameter σ is used for the two other distributions. AIC : Akaike likelihood criterion.*

| Type | Distribution | a | b | g | σ ou/or β | AIC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Saila-Lorda | Normal | 0.231 | 0.756 | 3.790 | 0.536 | 43.590 |
| Saila-Lorda | Gamma | 0.272 | 0.550 | 2.945 | 1.732 | 47.804 |
| Ricker | Gamma | 0.590 | 0.142 | NA | 1.565 | 47.985 |
| Baton de Hockey / Hockey stick | Gamma | 1.751 | 5.115 | NA | 1.551 | 48.180 |
| Beverton-Holt | Gamma | 2.485 | 3.949 | NA | 1.508 | 48.780 |
| Puissance / Power | Gamma | 0.618 | 0.482 | NA | 1.472 | 49.313 |
| Sherpherd | Gamma | 0.180 | 2.100 | 2.979 | 1.575 | 49.847 |
| Beverton-Holt sigmoïde / sigmoide | Gamma | 1.639 | 9.065 | 2.972 | 1.575 | 49.847 |
| Baton de Hockey / Hockey stick | Normal | 1.457 | 3.486 | NA | 0.665 | 50.267 |
| Beverton-Holt sigmoïde / sigmoide | Normal | 1.647 | 17.490 | 3.785 | 0.646 | 51.340 |
| Sherpherd | Normal | 0.095 | 2.131 | 3.777 | 0.646 | 51.340 |
| Ricker | Log-normal | 0.362 | 0.116 | NA | 0.987 | 51.829 |
| Ricker | Normal | 0.691 | 0.171 | NA | 0.693 | 51.870 |
| Beverton-Holt | Log-normal | 1.841 | 4.534 | NA | 0.995 | 52.127 |
| Puissance / Power | Log-normal | 0.406 | 0.512 | NA | 1.000 | 52.313 |
| Baton de Hockey / Hockey stick | Log-normal | 1.027 | 3.485 | NA | 1.003 | 52.407 |
| Saila-Lorda | Log-normal | 0.255 | 0.285 | 1.834 | 0.979 | 53.533 |
| Sherpherd | Log-normal | 0.317 | 2.701 | 1.499 | 0.994 | 54.067 |
| Beverton-Holt sigmoïde / sigmoide | Log-normal | 1.404 | 4.425 | 1.498 | 0.994 | 54.067 |
| Beverton-Holt | Normal | 2.297 | 3.315 | NA | 0.733 | 54.318 |
| Puissance / Power | Normal | 0.696 | 0.404 | NA | 0.754 | 55.718 |

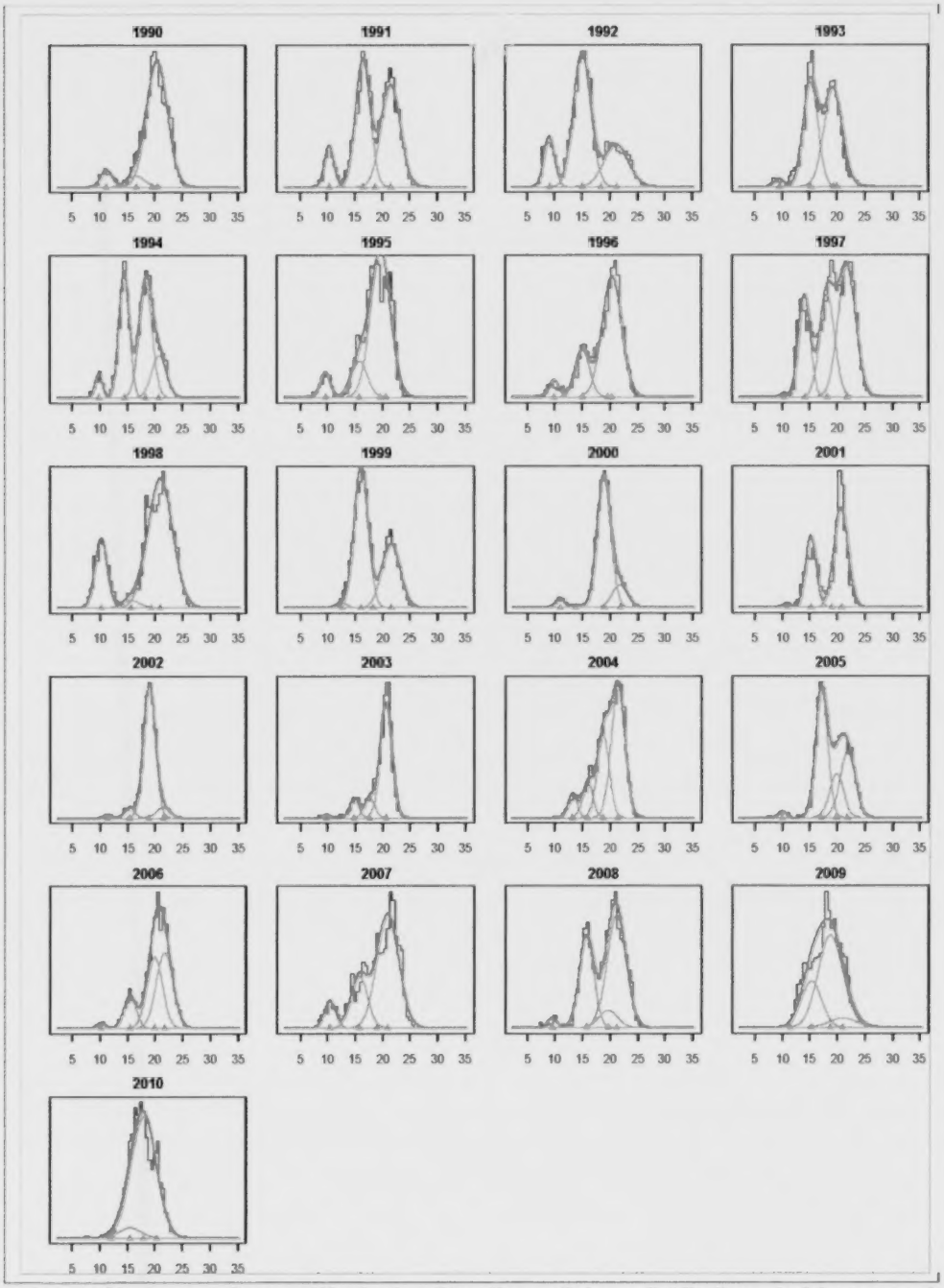



*Figure 1.* *Ajustement d'un modèle de densité mélange fini aux distributions de fréquences de longueurs des mâles du relevé de recherche.*

*Figure 1.* *Adjustment of a finite mixture distribution model to the male length frequency distributions from the research survey.*

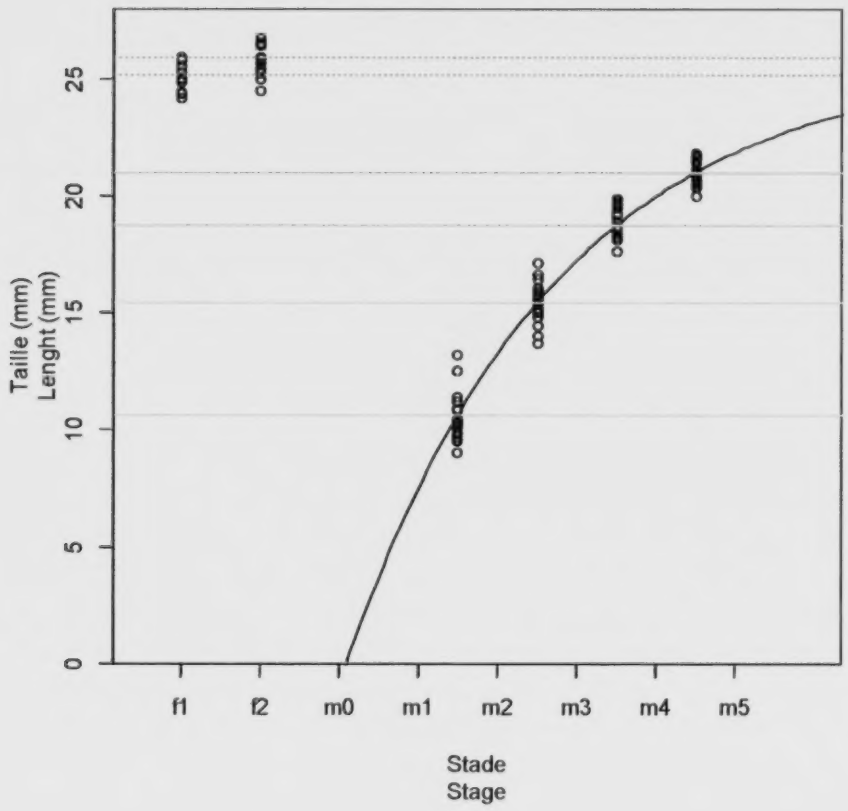



*Figure 2.* *Taille moyenne des femelles (f1 : primipares et f2 : multipares) du relevé de recherche pour les années 1990 à 2000, 2009 et 2010 et taille moyenne des cohortes mâles (m1 à m4) selon un ajustement annuel d'un modèle de densité mélange fini aux distributions de fréquences de longueurs des données du relevé de 1990 à 2010. Le relevé à lieu en milieu d'année et les paramètres utilisés pour tracer la courbe de von Bertalanffy sont présentés au tableau 1.*

*Figure 2.* *Mean size of females (f1: primiparous and f2: multiparous) from the research survey for 1990 to 2000, 2009 and 2010 and mean size of the male cohorts (m1 to m4) from the annual adjustment of a finite mixture distribution model to the male length frequency distributions from the research survey data from 1990 to 2010. The survey takes place in the mid-year and the parameters used to draw the von Bertalanffy curve are presented in table 1.*

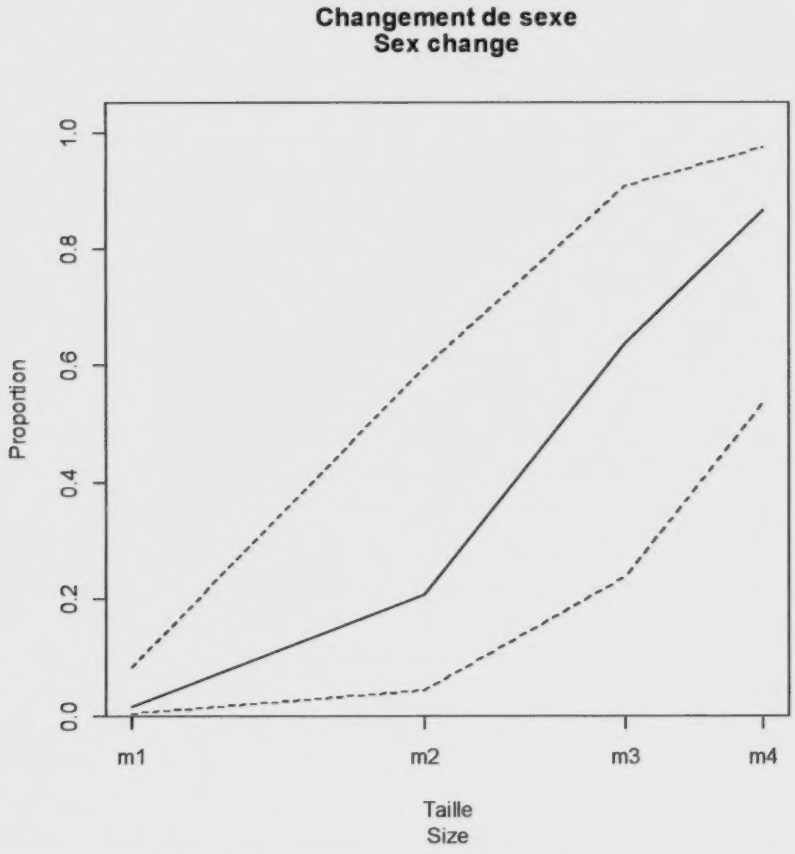



*Figure 3.* *Proportion des individus susceptibles de changer de sexe en fonction du stade. La position d'un stade sur l'axe des x est proportionnelle à sa taille. La ligne pleine représente le cas de base et les lignes pointillées, les scénarios de changement de sexe hâtif (CS-) et tardif (CS+).*

*Figure 3.* *Proportion of the individuals likely to change sex by stage. The location of a stage on the x axis is proportional to its size. The full line represents the base case and the dashed lines, the scenarios of early (CS-) and late (CS+) sex change.*

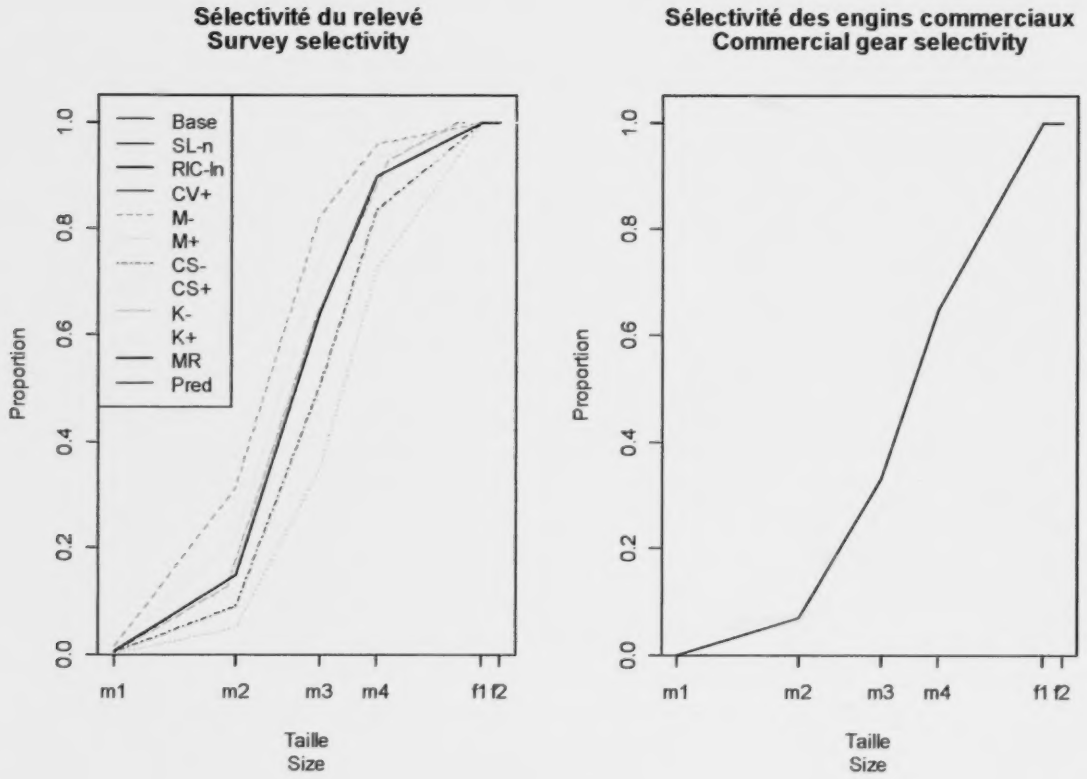



*Figure 4.* *Courbes de sélectivité des chaluts du relevé et de la pêche commerciale. La position d'un stade sur l'axe des x est proportionnelle à sa taille. La ligne pleine le cas de base et les lignes pointillées, les scénarios de l'analyse de sensibilité.*

*Figure 4.* *Selectivity curves for the survey and commercial fishery trawls. The location of a stage on the x axis is proportional to its size. The full line represents the base case and the dashed lines, the scenarios for the sensitivity analysis.*

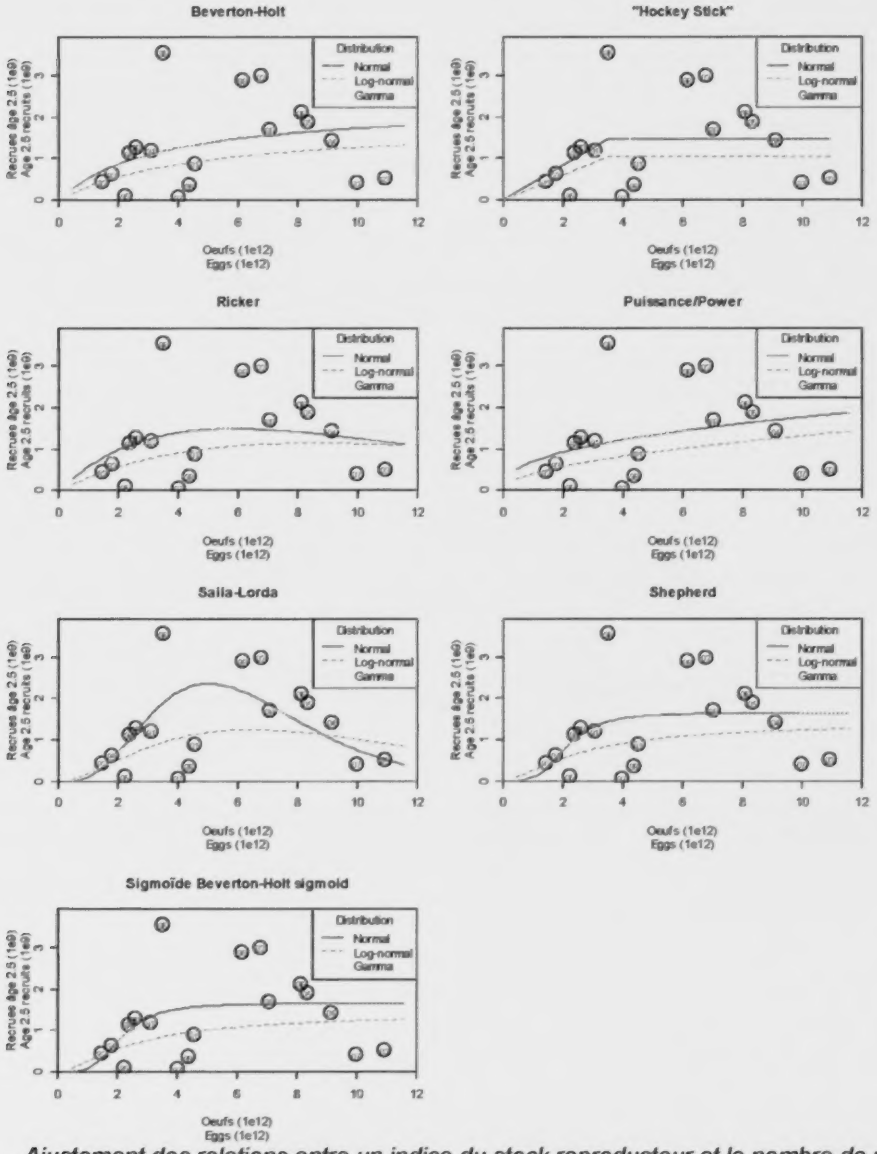



*Figure 5. Ajustement des relations entre un indice du stock reproducteur et le nombre de recrues. Chaque point est identifié par l'année où les œufs ont été pondus et fertilisés ce qui correspond à trois années avant que les recrues (m2) ne soient observées dans le relevé. La légende indique les distributions utilisées pour ajuster les courbes.*

*Figure 5. Adjustment of the relationships between a spawning stock index and the number of recruits. Each data point is identified by the year when the eggs were spawned and fertilized which corresponds to three years before the recruits (m2) were observed in the survey. The legend indicates the distributions used to adjust the curves.*

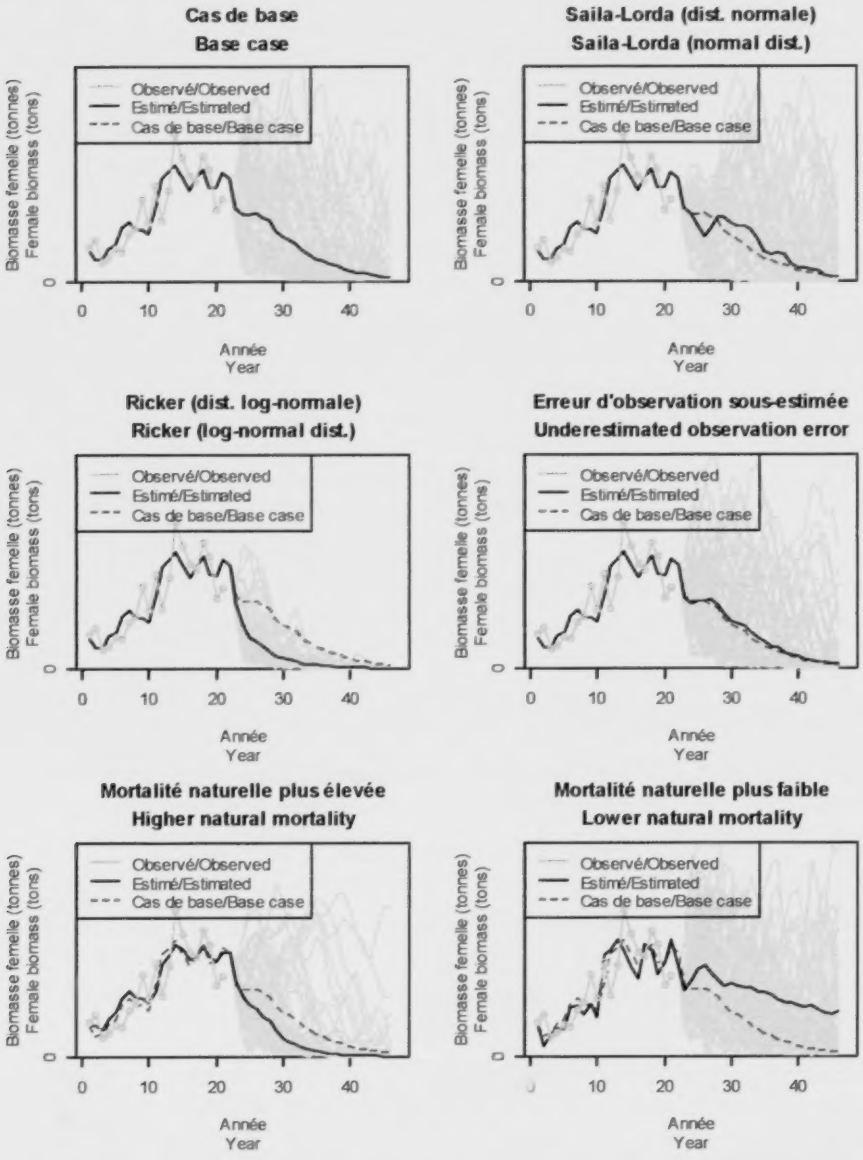



*Figure 6. Résultats de la simulation de la règle de prélèvement A (TAC constant): ajustement de la biomasse femelle du modèle aux données du relevé pour les années 1 à 21 et projections sur 25 ans (années 22 à 46), selon les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Les lignes grises représentent 50 exemples de la trajectoire de la population et la ligne noire représente la médiane des 1 001 projections.*

*Figure 6. Results of the simulation of the harvesting rule A (constant TAC): adjustment of the model female biomass to the survey data for the years 1 to 21 and 25 year projections (years 22 to 46), for the 12 scenarios of the sensitivity analysis. The gray lines represent 50 examples of the population trajectory and the black line represents the median of the 1,001 projections.*

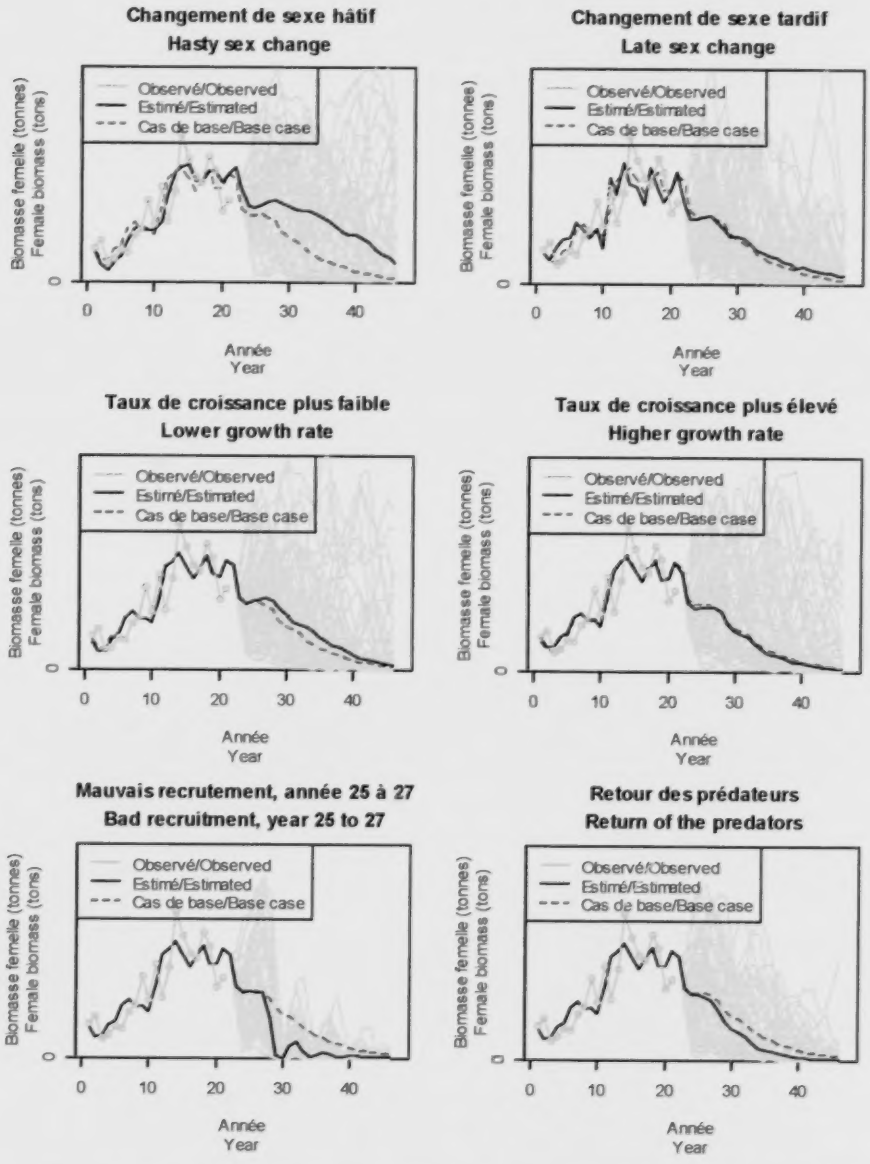



*Figure 6 suite. Résultats de la simulation de la règle de prélèvement A (TAC constant): ajustement de la biomasse femelle du modèle aux données du relevé pour les années 1 à 21 et projections sur 25 ans (années 22 à 46), selon les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Les lignes grises représentent 50 exemples de la trajectoire de la population et la ligne noire représente la médiane des 1 001 projections.*

*Figure 6 continued. Results of the simulation of the harvesting rule A (constant TAC): adjustment of the model female biomass to the survey data for the years 1 to 21 and 25 year projections (years 22 to 46), for the 12 scenarios of the sensitivity analysis. The gray lines represent 50 examples of the population trajectory and the black line represents the median of the 1,001 projections.*

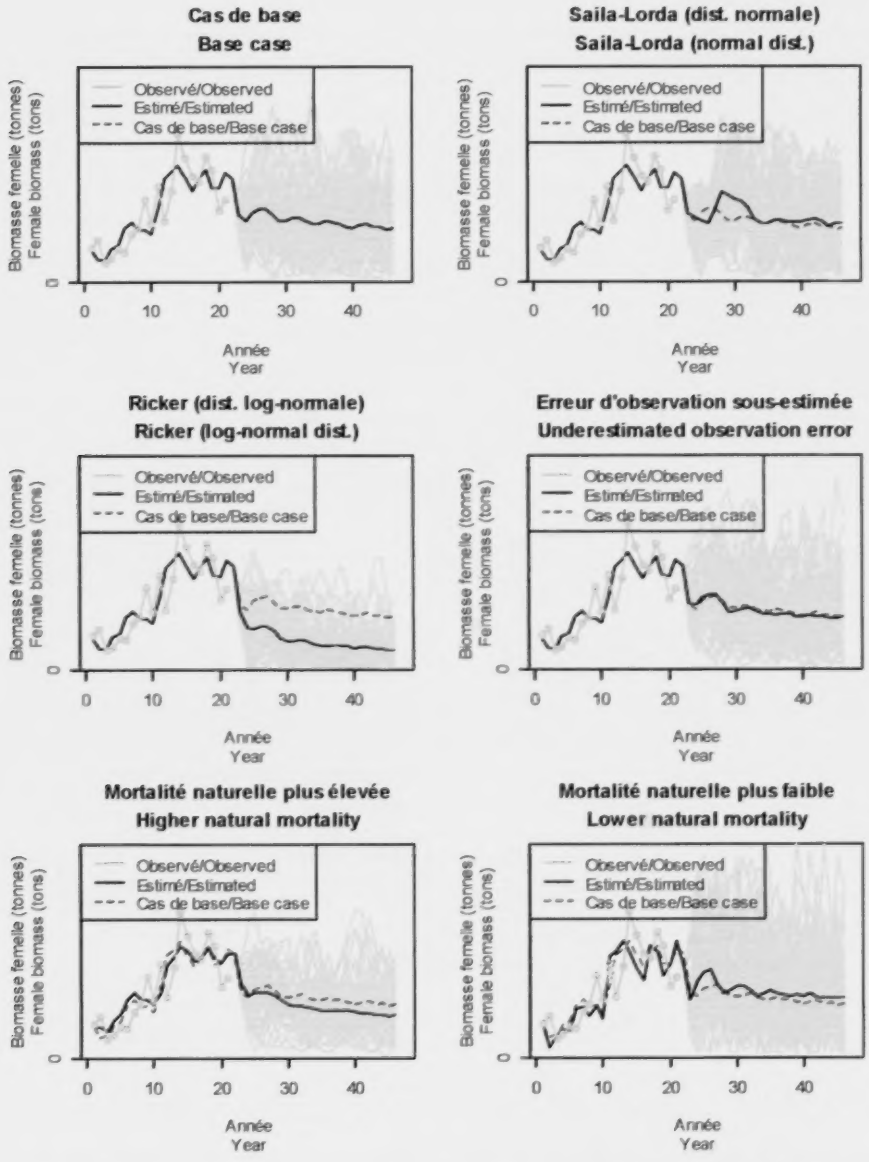



*Figure 7.* *Résultats de la simulation de la règle de prélèvement B (taux d'exploitation constant): ajustement de la biomasse femelle du modèle aux données du relevé pour les années 1 à 21 et projections sur 25 ans (années 22 à 46), selon les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Les lignes grises représentent 50 exemples de la trajectoire de la population et la ligne noire représente la médiane des 1 001 projections.*

*Figure 7.* *Results of the simulation of the harvesting rule B (constant exploitation rate): adjustment of the model female biomass to the survey data for the years 1 to 21 and 25 year projections (years 22 to 46), for the 12 scenarios of the sensitivity analysis. The gray lines represent 50 examples of the population trajectory and the black line represents the median of the 1,001 projections.*

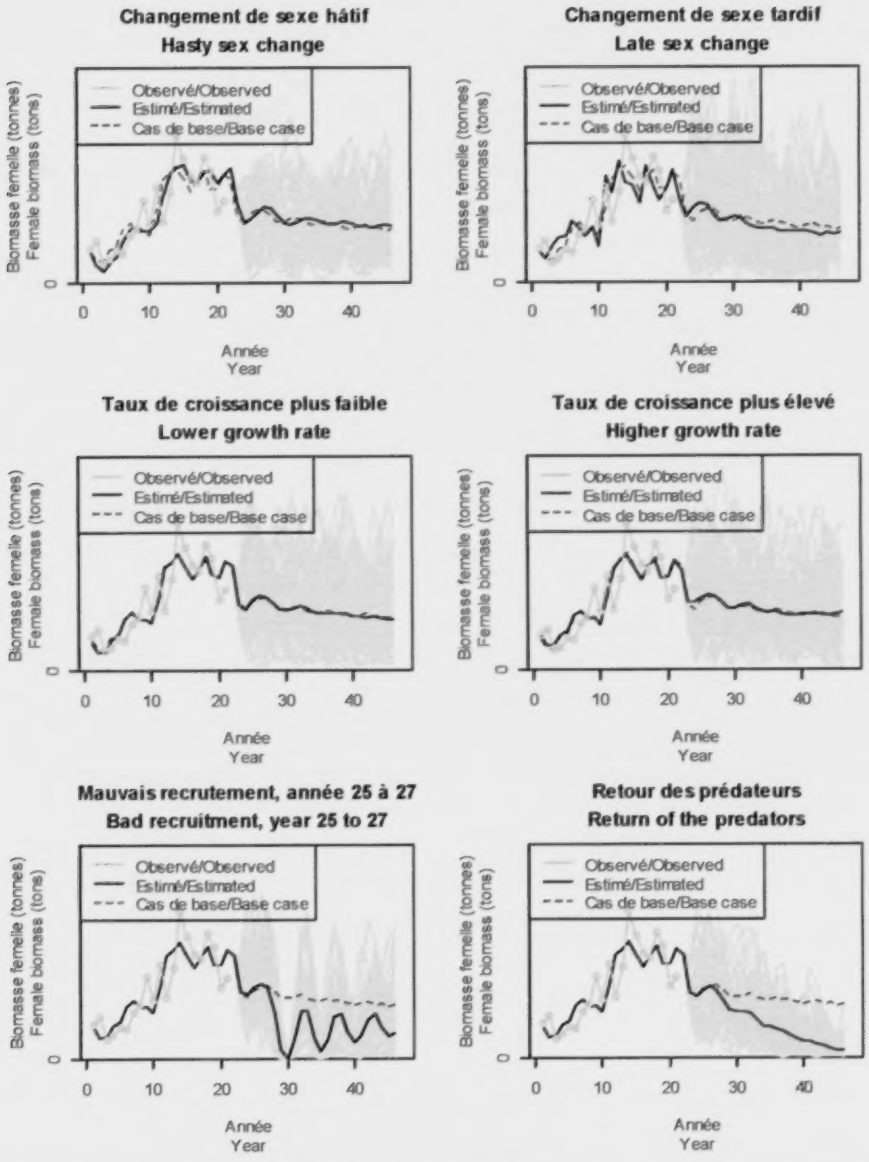



*Figure 7 suite. Résultats de la simulation de la règle de prélèvement B (taux d'exploitation constant): ajustement de la biomasse femelle du modèle aux données du relevé pour les années 1 à 21 et projections sur 25 ans (années 22 à 46), selon les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Les lignes grises représentent 50 exemples de la trajectoire de la population et la ligne noire représente la médiane des 1 001 projections.*

*Figure 7 continued. Results of the simulation of the harvesting rule B (constant exploitation rate): adjustment of the model female biomass to the survey data for the years 1 to 21 and 25 year projections (years 22 to 46), for the 12 scenarios of the sensitivity analysis. The gray lines represent 50 examples of the population trajectory and the black line represents the median of the 1,001 projections.*

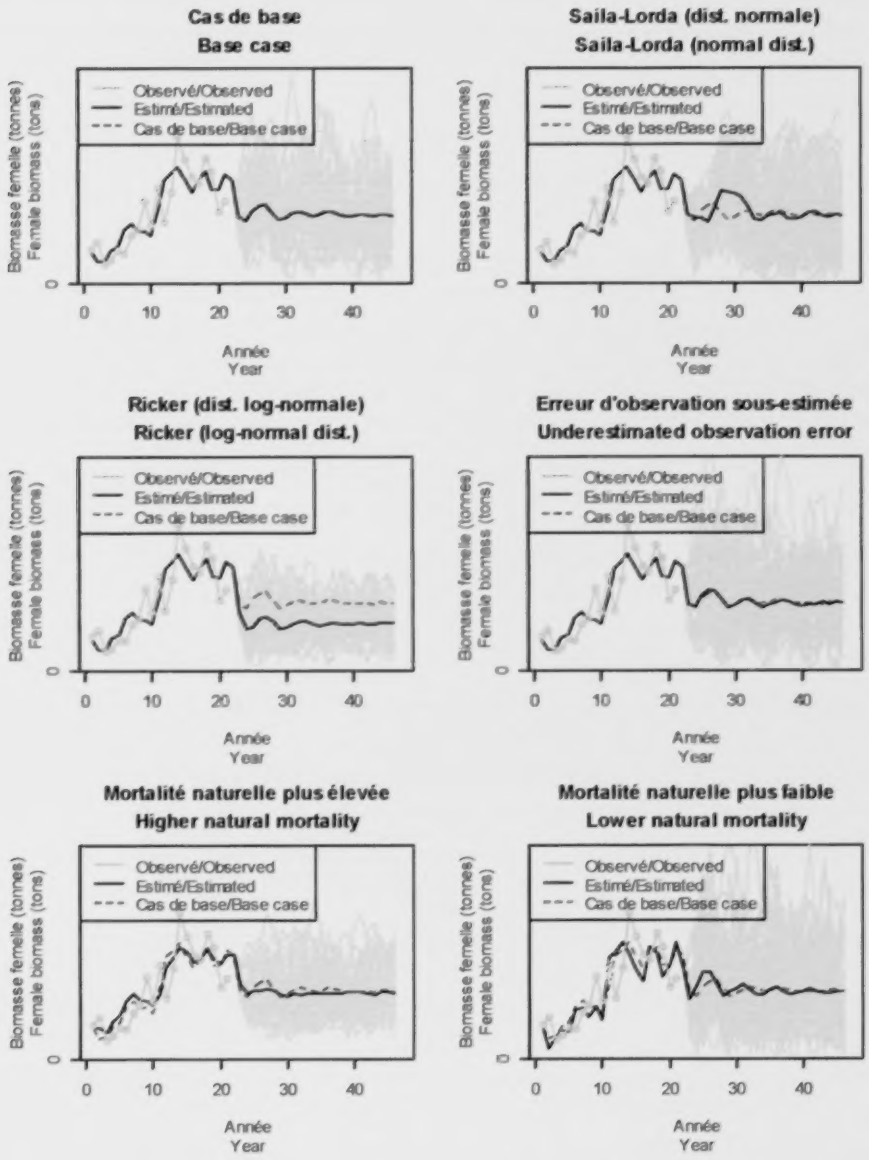



*Figure 8. Résultats de la simulation de la règle de prélèvement C (conforme à une approche de précaution): ajustement de la biomasse femelle du modèle aux données du relevé pour les années 1 à 21 et projections sur 25 ans (années 22 à 46), selon les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Les lignes grises représentent 50 exemples de la trajectoire de la population et la ligne noire représente la médiane des 1 001 projections.*

*Figure 8. Results of the simulation of the harvesting rule C (compliant with a precautionary approach): adjustment of the model female biomass to the survey data for the years 1 to 21 and 25 year projections (years 22 to 46), for the 12 scenarios of the sensitivity analysis. The gray lines represent 50 examples of the population trajectory and the black line represents the median of the 1,001 projections.*

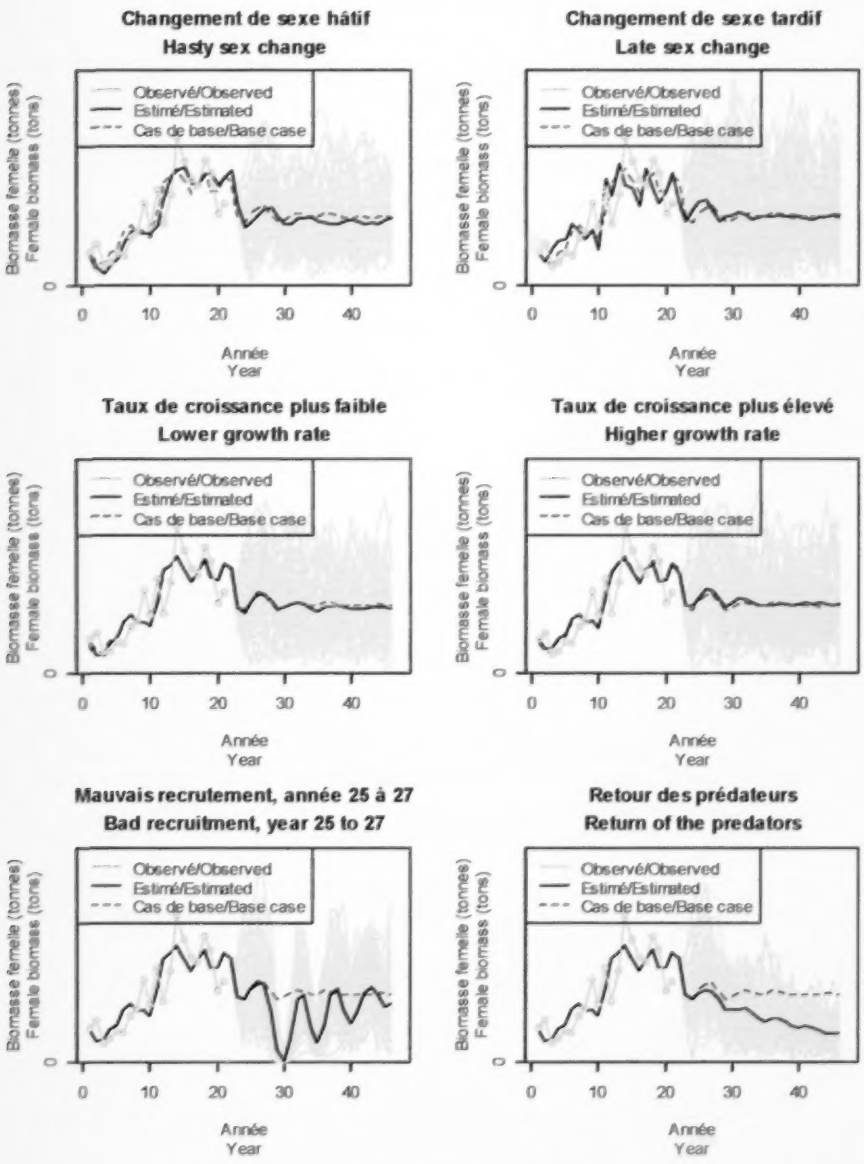



*Figure 8 suite. Résultats de la simulation de la règle de prélèvement C (conforme à une approche de précaution): ajustement de la biomasse femelle du modèle aux données du relevé pour les années 1 à 21 et projections sur 25 ans (années 22 à 46), selon les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Les lignes grises représentent 50 exemples de la trajectoire de la population et la ligne noire représente la médiane des 1 001 projections.*

*Figure 8 continued. Results of the simulation of the harvesting rule C (compliant with a precautionary approach): adjustment of the model female biomass to the survey data for the years 1 to 21 and 25 year projections (years 22 to 46), for the 12 scenarios of the sensitivity analysis. The gray lines represent 50 examples of the population trajectory and the black line represents the median of the 1,001 projections.*

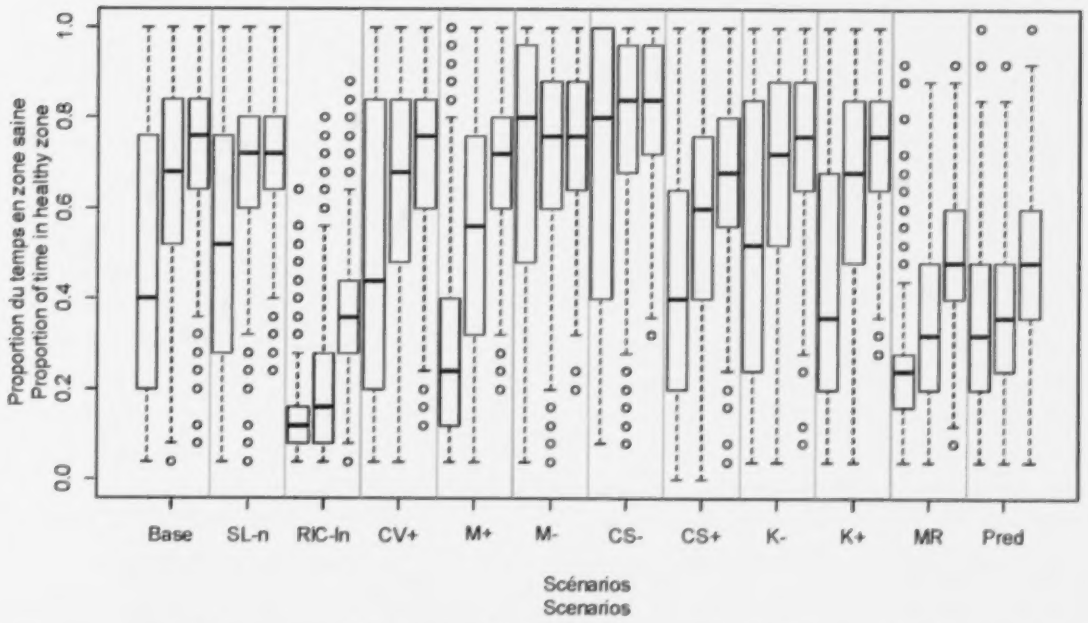



*Figure 9.* *Boîte à moustaches du nombre d'années (en proportion des 25 années de projection) que le stock est situé en zone saine pour les 1 001 itérations, selon les trois règles de prélèvement et les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Pour chaque scénario, les règles de prélèvement sont de gauche à droite : A, B et C. Voir section «Analyse de sensibilité» pour la description des 12 scénarios.*

*Figure 9.* *Boxplot of the number of years (in proportion of the 25 year projections) that the stock is located in the healthy zone for the 1,001 iterations, for the three harvest rules and the 12 scenarios of the sensitivity analysis. For each scenario, the harvest rules are from left to right: A, B and C. See section «Sensitivity analysis» for the description of the 12 scenarios.*

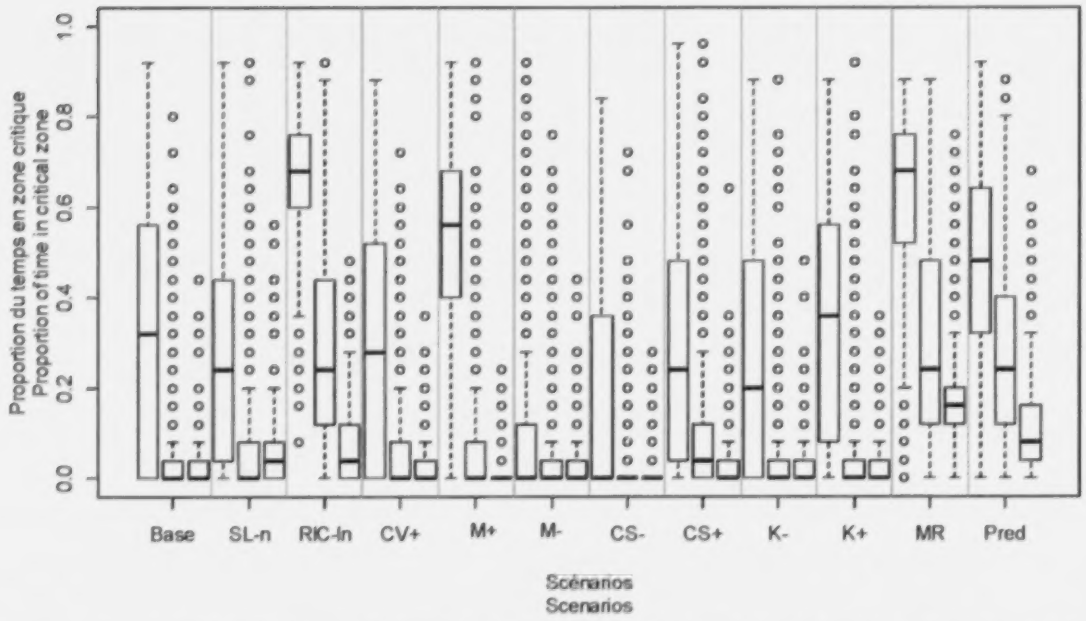



*Figure 10. Boîte à moustaches du nombre d'années (en proportion des 25 années de projection) que le stock est situé en zone critique pour les 1 001 itérations, selon les trois règles de prélèvement et les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Pour chaque scénario, les règles de prélèvement sont de gauche à droite : A, B et C. Voir section «Analyse de sensibilité» pour la description des 12 scénarios.*

*Figure 10. Boxplot of the number of years (in proportion of the 25 year projections) that the stock is located in the critical zone for the 1,001 iterations, for the three harvest rules and the 12 scenarios of the sensitivity analysis. For each scenario, the harvest rules are from left to right: A, B and C. See section «Sensitivity analysis» for the description of the 12 scenarios.*

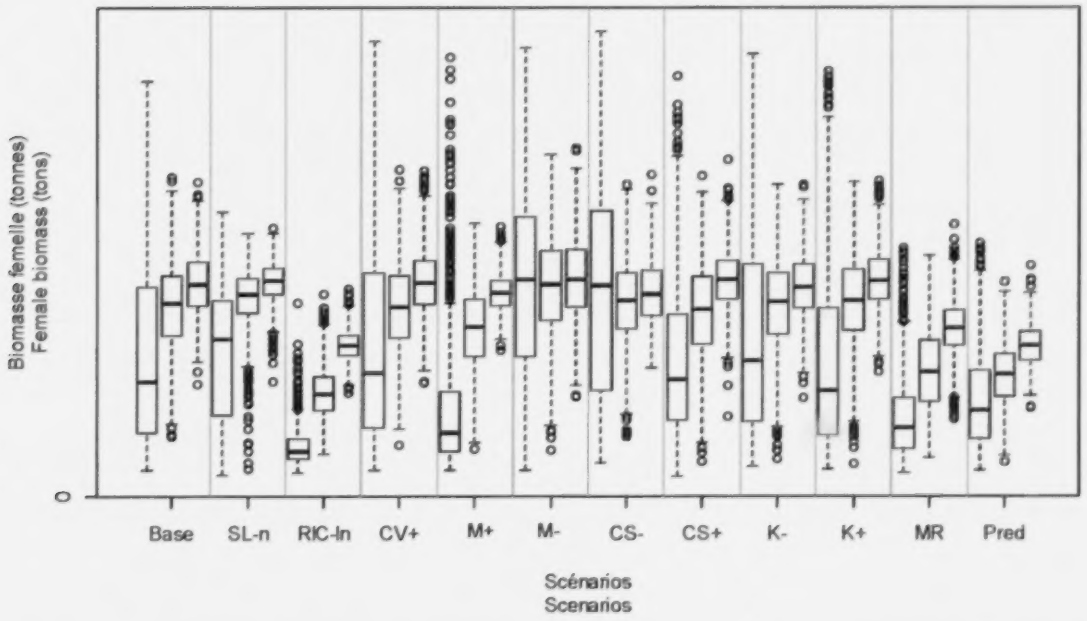



*Figure 11. Boîte à moustaches de la biomasse moyenne des femelles sur les 25 années de projection, pour les 1 001 itérations, selon les trois règles de prélèvement et les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Pour chaque scénario, les règles de prélèvement sont de gauche à droite : A, B et C. Voir section «Analyse de sensibilité» pour la description des 12 scénarios.*

*Figure 11. Boxplot of the mean biomass of females over the 25 year projections, for the 1,001 iterations, for the three harvest rules and the 12 scenarios of the sensitivity analysis. For each scenario, the harvest rules are from left to right: A, B and C. See section «Sensitivity analysis» for the description of the 12 scenarios.*

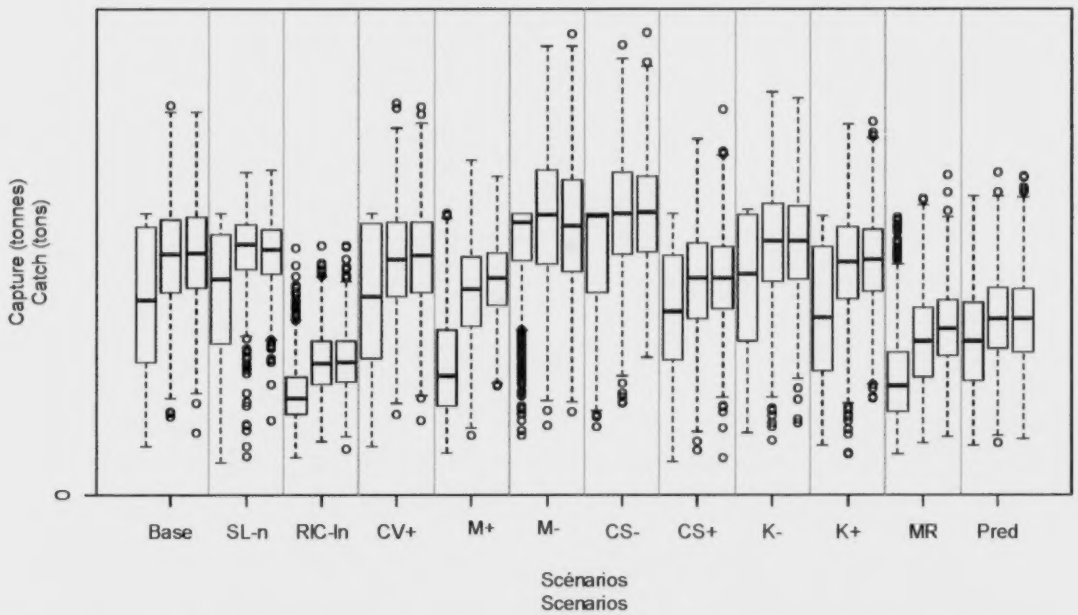



*Figure 12. Boîte à moustaches du débarquement moyen sur les 25 années de projection, pour les 1 001 itérations, selon les trois règles de prélèvement et les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Pour chaque scénario, les règles de prélèvement sont de gauche à droite : A, B et C. Voir section «Analyse de sensibilité» pour la description des 12 scénarios.*

*Figure 12. Boxplot of the mean landing over the 25 year projections, for the 1,001 iterations, for the three harvest rules and the 12 scenarios of the sensitivity analysis. For each scenario, the harvest rules are from left to right: A, B and C. See section «Sensitivity analysis» for the description of the 12 scenarios.*

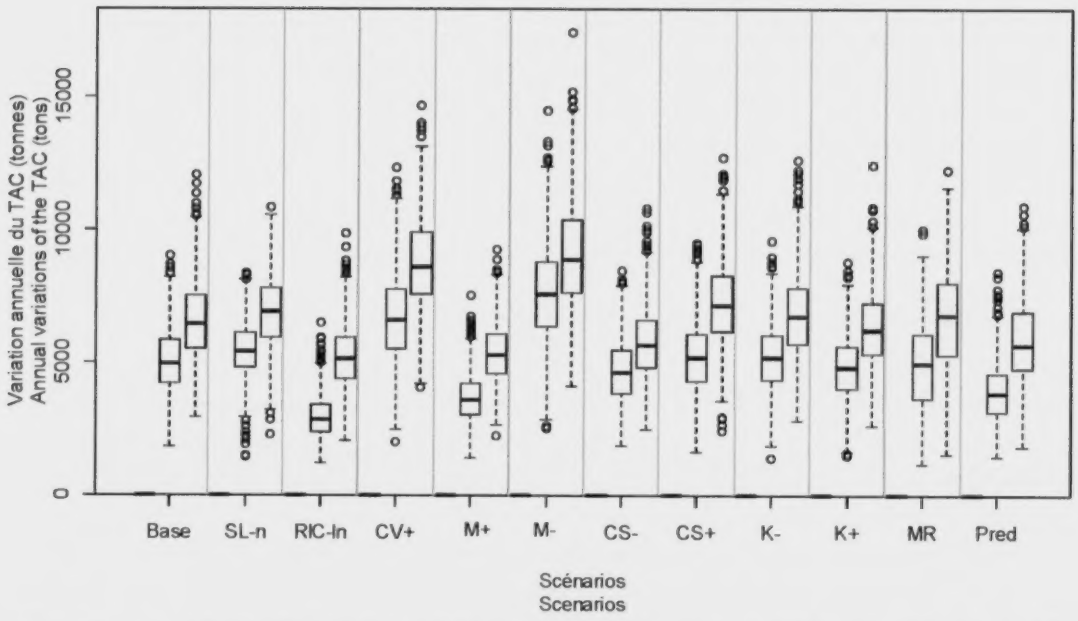



*Figure 13. Boîte à moustaches des variations annuelles moyennes du TAC sur les 25 années de projection, pour les 1 001 itérations, selon les trois règles de prélèvement et les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Pour chaque scénario, les règles de prélèvement sont de gauche à droite : A, B et C. Voir section «Analyse de sensibilité» pour la description des 12 scénarios.*

*Figure 13. Boxplot of the mean of the TAC yearly variations over the 25 year projections, for the 1,001 iterations, for the three harvest rules and the 12 scenarios of the sensitivity analysis. For each scenario, the harvest rules are from left to right: A, B and C. See section «Sensitivity analysis» for the description of the 12 scenarios.*

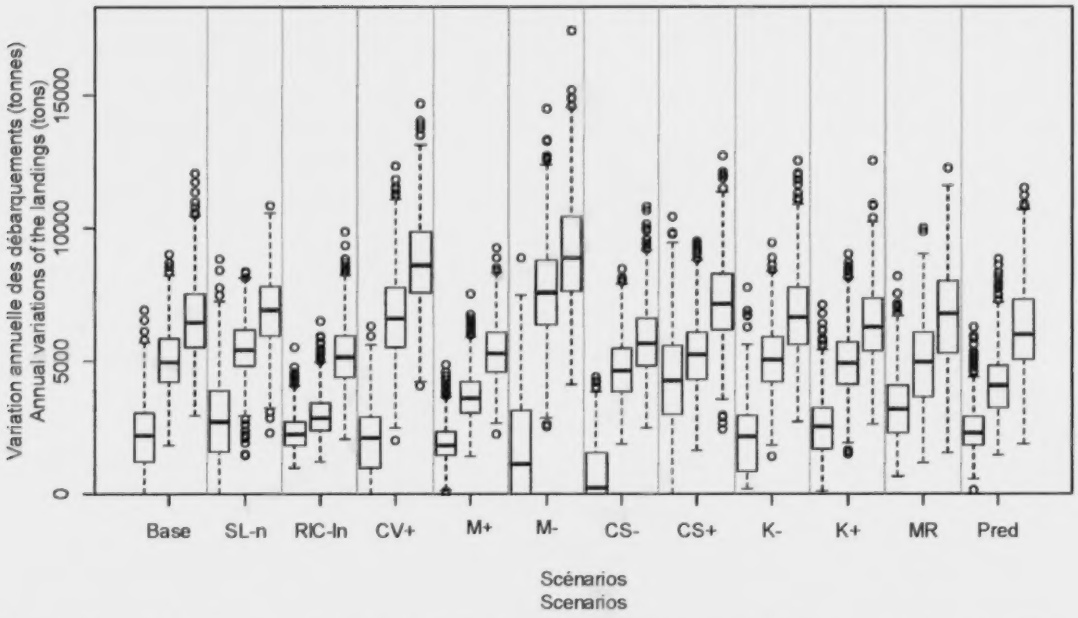



*Figure 14. Boîte à moustaches des variations annuelles moyennes du débarquement sur les 25 années de projection, pour les 1 001 itérations, selon les trois règles de prélèvement et les 12 scénarios de l'analyse de sensibilité. Pour chaque scénario, les règles de prélèvement sont de gauche à droite : A, B et C. Voir section «Analyse de sensibilité» pour la description des 12 scénarios.*

*Figure 14. Boxplot of the mean of the landing yearly variations over the 25 year projections, for the 1,001 iterations, for the three harvest rules and the 12 scenarios of the sensitivity analysis. For each scenario, the harvest rules are from left to right: A, B and C. See section «Sensitivity analysis» for the description of the 12 scenarios.*

*Annexe 1. Description des treize règles de décision du TAC présentées au Comité Consultatif de la Crevette du Golfe en février 2012.*

*Appendix 1. Description of the thirteen TAC decision rules presented and the Gulf Shrimp Advisory Committee in February 2012.*

RÈGLE SIMPLE
SIMPLE RULE

**1 : règle informelle / informal rule**

$$TAC_{t+1} = ia_t * tac0 * 0.8 + tac0 * 0.4$$

**2 : règle conforme à l'AP / rule compliant with a PA**

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} 0 & ia_t \le b_{\lim} \\ \dfrac{ia_t - b_{\lim}}{b_{\sup} - b_{\lim}} * tac0 & \text{si / if} \quad b_{\lim} < ia_t \le b_{\sup} \\ ia_t * tac0 & ia_t > b_{\sup} \end{cases}$$

LISSAGE DES VARIATIONS DES INDICATEURS & RÈGLE # 2 /
SMOOTHING OF VARIATIONS IN INDICATORS & RULE # 2

**3 : moyenne des 2 derniers indicateurs / mean of the last 2 indicators**

$$iaMoyMob_t = \frac{ia_t + ia_{t-1}}{2}$$

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} 0 & iaMoyMob_t \le b_{\lim} \\ \dfrac{iaMoyMob_t - b_{\lim}}{b_{\sup} - b_{\lim}} * tac0 & \text{si / if} \quad b_{\lim} < iaMoyMob_t \le b_{\sup} \\ iaMoyMob_t * tac0 & iaMoyMob_t > b_{\sup} \end{cases}$$

**4 : lissage exponentiel sur les indicateurs / exponential smoother on the indicators**

$$iaLisse_t = 0.5 * \sum_{i=1}^{t} ia_{t-i+1} * 0.5^{i-1}$$

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} 0 & iaLisse_t \le b_{\lim} \\ \dfrac{iaLisse_t - b_{\lim}}{b_{\sup} - b_{\lim}} * tac0 & \text{si} \quad b_{\lim} < iaLisse_t \le b_{\sup} \\ iaLisse_t * tac0 & iaLisse_t > b_{\sup} \end{cases}$$

RÈGLE # 2 & SEUIL AVANT DE CHANGER LE TAC /
RULE # 2 & THRESHOLD BEFORE CHANGING THE TAC

**5 : 5% dans les 3 zones / 5% in the 3 zones**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| < 0.05 * TAC_t \\ & \text{si} \\ TAC_t & \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| \geq 0.05 * TAC_t \end{cases}$$

**6 : 5% dans la zone saine seulement / 5% in the healthy zone only**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & ia_t \leq b_{\sup} \\ TAC_{temp} \text{ si / if } & ia_t > b_{\sup} \wedge \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| \geq 0.05 * TAC_t \\ TAC_t & ia_t > b_{\sup} \wedge \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| < 0.05 * TAC_t \end{cases}$$

**7 : 10% dans les 3 zones / 10% in the 3 zones**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| < 0.10 * TAC_t \\ & \text{si / if} \\ TAC_t & \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| \geq 0.10 * TAC_t \end{cases}$$

**8 : 10% dans la zone saine seulement / 10% in the healthy zone only**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & ia_t \leq b_{\sup} \\ TAC_{temp} \text{ si /if } & ia_t > b_{\sup} \wedge \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| \geq 0.10 * TAC_t \\ TAC_t & ia_t > b_{\sup} \wedge \left|TAC_{temp} - TAC_t\right| < 0.10 * TAC_t \end{cases}$$

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} 0 & ia_t \leq b_{\lim} \\ \dfrac{ia_t - b_{\lim}}{b_{\sup} - b_{\lim}} * tac0 & b_{\lim} < ia_t \leq b_{\sup} \\ ia_t * tac0 & \text{si / if } \quad ia_t > b_{\sup} \wedge \left|ia_t * tac0 - TAC_t\right| \geq 0.10 * TAC_t \\ TAC_t & ia_t > b_{\sup} \wedge \left|ia_t * tac0 - TAC_t\right| < 0.10 * TAC_t \end{cases}$$

RÈGLE # 2 & PLAFOND SUR LE CHANGEMENT DE TAC /
RULE # 2 & CAP FOR THE CHANGE IN TAC

**9 : 15% dans les 3 zones / 15% in the 3 zones**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & (1-0.15)*TAC_t \le TAC_{temp} < \frac{1}{(1-0.15)}*TAC_t \\ TAC_t*(1-0.15) & \text{si / if } TAC_{temp} < (1-0.15)*TAC_t \\ TAC_t*\frac{1}{(1-0.15)} & TAC_{temp} \ge \frac{1}{(1-0.15)}*TAC_t \end{cases}$$

**10 : 15% dans la zone saine seulement / 15% in the healthy zone only**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & ia_t \le b_{sup} \\ TAC_{temp} & ia_t > b_{sup} \wedge (1-0.15)*TAC_t \le TAC_{temp} < \frac{1}{(1-0.15)}*TAC_t \\ TAC_{temp}*(1-0.15) & \text{si /if } ia_t > b_{sup} \wedge TAC_{temp} < (1-0.15)*TAC_t \\ TAC_{temp}*\frac{1}{(1-0.15)} & ia_t > b_{sup} \wedge TAC_{temp} \ge \frac{1}{(1-0.15)}*TAC_t \end{cases}$$

**11 : 25% dans les 3 zones / 25% in the 3 zones**

$TAC_{temp}$ = Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & (1-0.25)*TAC_t \le TAC_{temp} < \frac{1}{(1-0.25)}*TAC_t \\ TAC_t*(1-0.25) & \text{si } TAC_{temp} < (1-0.25)*TAC_t \\ TAC_t*\frac{1}{(1-0.25)} & TAC_{temp} \ge \frac{1}{(1-0.25)}*TAC_t \end{cases}$$

**12 : 25% dans la zone saine seulement / 25% in the healthy zone only**

$TAC_{temp} =$ Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_{temp} & ia_t \le b_{sup} \\ TAC_{temp} & ia_t > b_{sup} \wedge (1-0.25) * TAC_t \le TAC_{temp} < {}^{1}\!/_{(1-0.25)} * TAC_t \\ TAC_{temp} * (1-0.25) & \text{si / if } ia_t > b_{sup} \wedge TAC_{temp} < (1-0.25) * TAC_t \\ TAC_{temp} * {}^{1}\!/_{(1-0.25)} & ia_t > b_{sup} \wedge TAC_{temp} \ge {}^{1}\!/_{(1-0.25)} * TAC_t \end{cases}$$

RÈGLE # 2 & APPLICATION MIXTE DE SEUIL & PLAFOND /
RULE # 2 & MIXED APPLICATION OF THRESHOLD & CAP

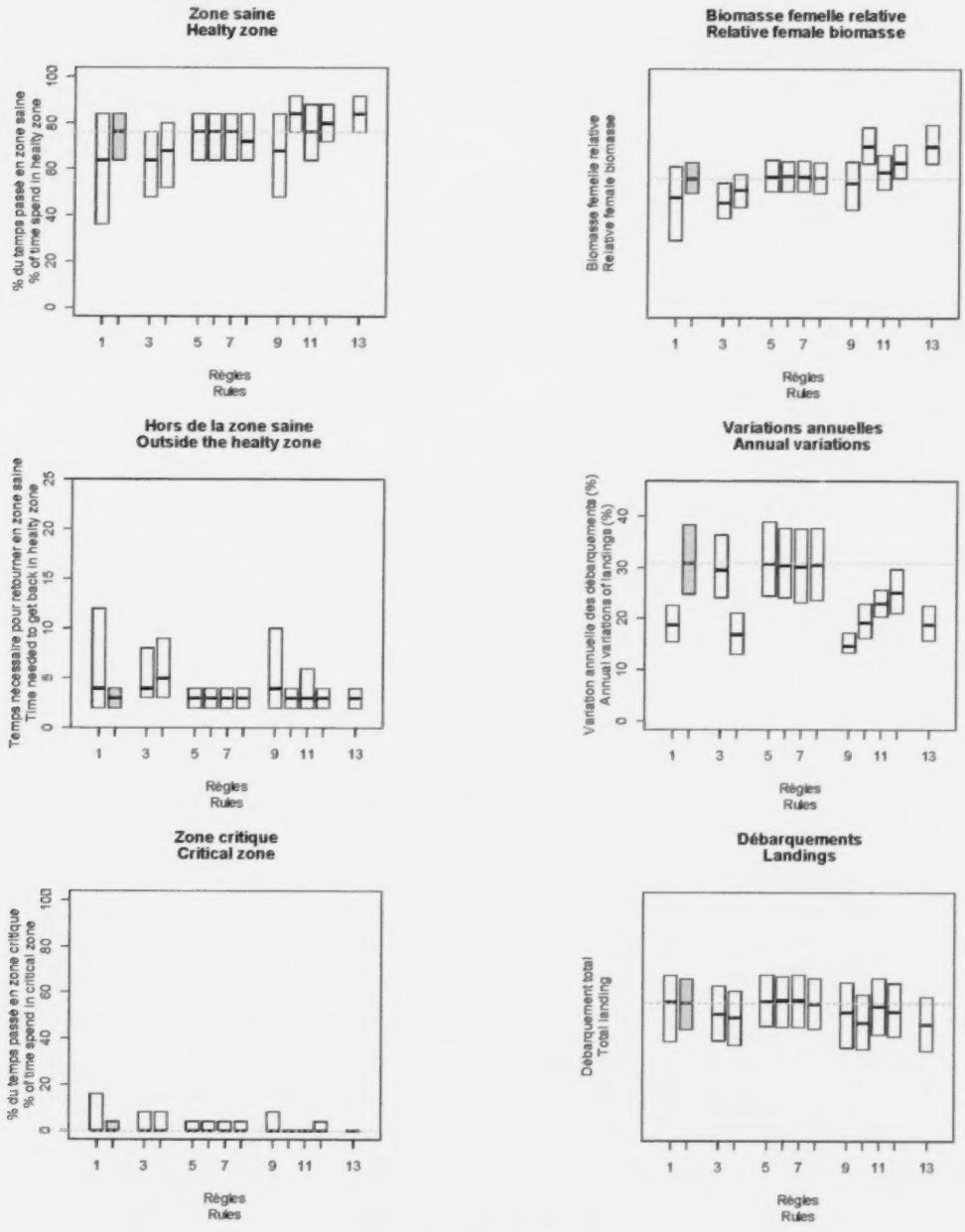
**13 : seuil de 5% dans les 3 zones & plafond de 15% en zone saine seulement / 5% threshold in the 3 zones & 15% cap in the healthy zone only**

$TAC_{temp} =$ Règle / Rule 2

$$TAC_{t+1} = \begin{cases} TAC_t & ia_t \le b_{sup} \wedge \left| TAC_{temp} - TAC_t \right| < 0.05 * TAC_t \\ TAC_{temp} & ia_t \le b_{sup} \wedge \left| TAC_{temp} - TAC_t \right| \ge 0.05 * TAC_t \\ TAC_{temp} & \text{si / if } ia_t > b_{sup} \wedge (1-0.15) * TAC_t \le TAC_{temp} < {}^{1}\!/_{(1-0.15)} * TAC_t \\ TAC_{temp} * (1-0.15) & ia_t > b_{sup} \wedge TAC_{temp} < (1-0.15) * TAC_t \\ TAC_{temp} * {}^{1}\!/_{(1-0.15)} & ia_t > b_{sup} \wedge TAC_{temp} \ge {}^{1}\!/_{(1-0.15)} * TAC_t \end{cases}$$

*Annexe 2. Indicateurs de performance des règles de décision du TAC simulées sous le scénario de base tels que présentés au Comité Consultatif de la Crevette du Golfe en février 2012. La description des règles est présentée à l'Annexe 1.*

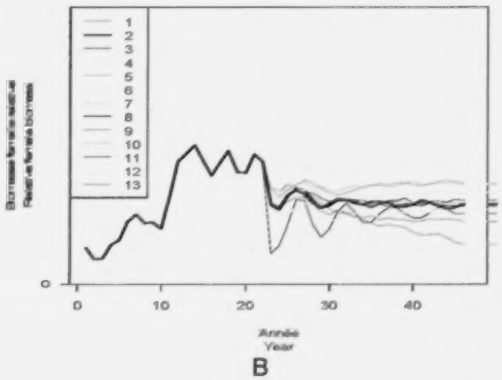
*Appendix 2. Indicators of the performance of the TAC decision rules simulated under the base scenario as presented and the Gulf Shrimp Advisory Committee in February 2012. The description of the rules is presented in Appendix 1.*



*Annexe 3. Projections de la trajectoire de la biomasse des femelles selon différents scénarios et règles de décision du TAC telles que présentés au Comité Consultatif de la Crevette du Golfe en février 2012. La description des règles est présentée à l'Annexe 1.*

*Appendix 3. Projections of the female biomass under different scenarios and TAC decision rules as presented and the Gulf Shrimp Advisory Committee in February 2012. The description of the rules is presented in Appendix 1.*

A




Scénarios / Scenarios

A : Cas de base / Base case

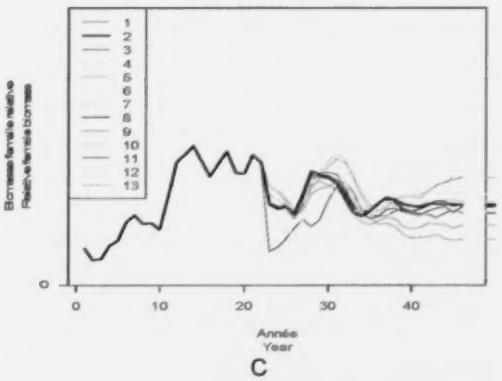
B : Relation stock-recrutement de type Saila-Lorda / Saila-Lords stock-recruitment relationship

C : changement de sexe hâtif / Early sex change

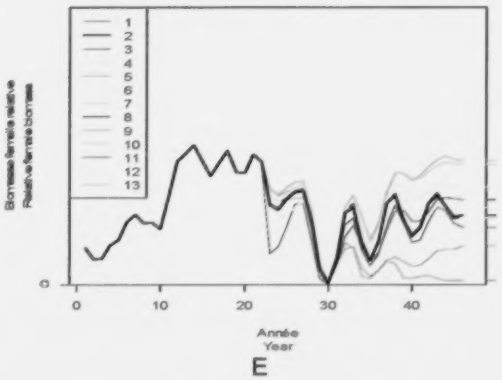
D : mauvais recrutement entre les années 25 et 27 / Bad recruitment between the years 25 and 27

E : augmentation graduelle de la mortalité naturelle / Gradual increase of the natural mortality

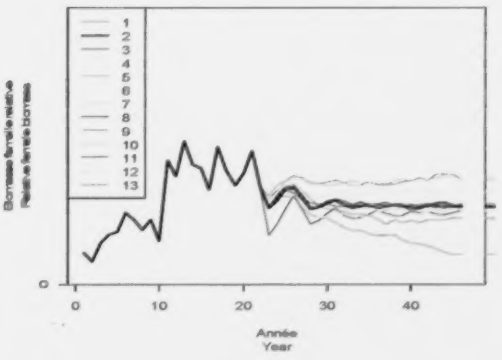
B



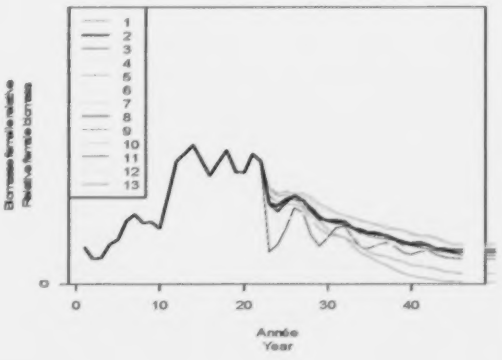

D




C

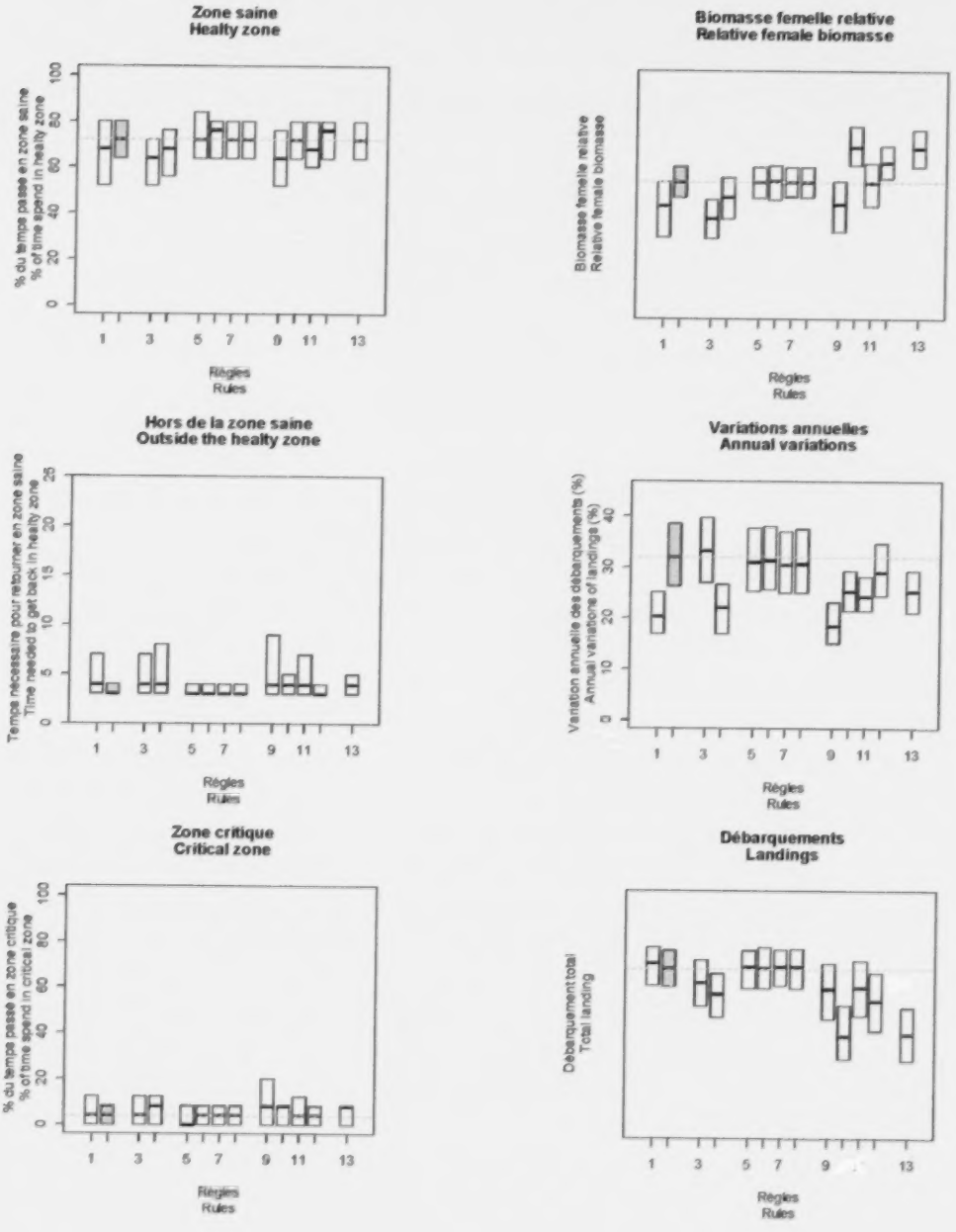



E



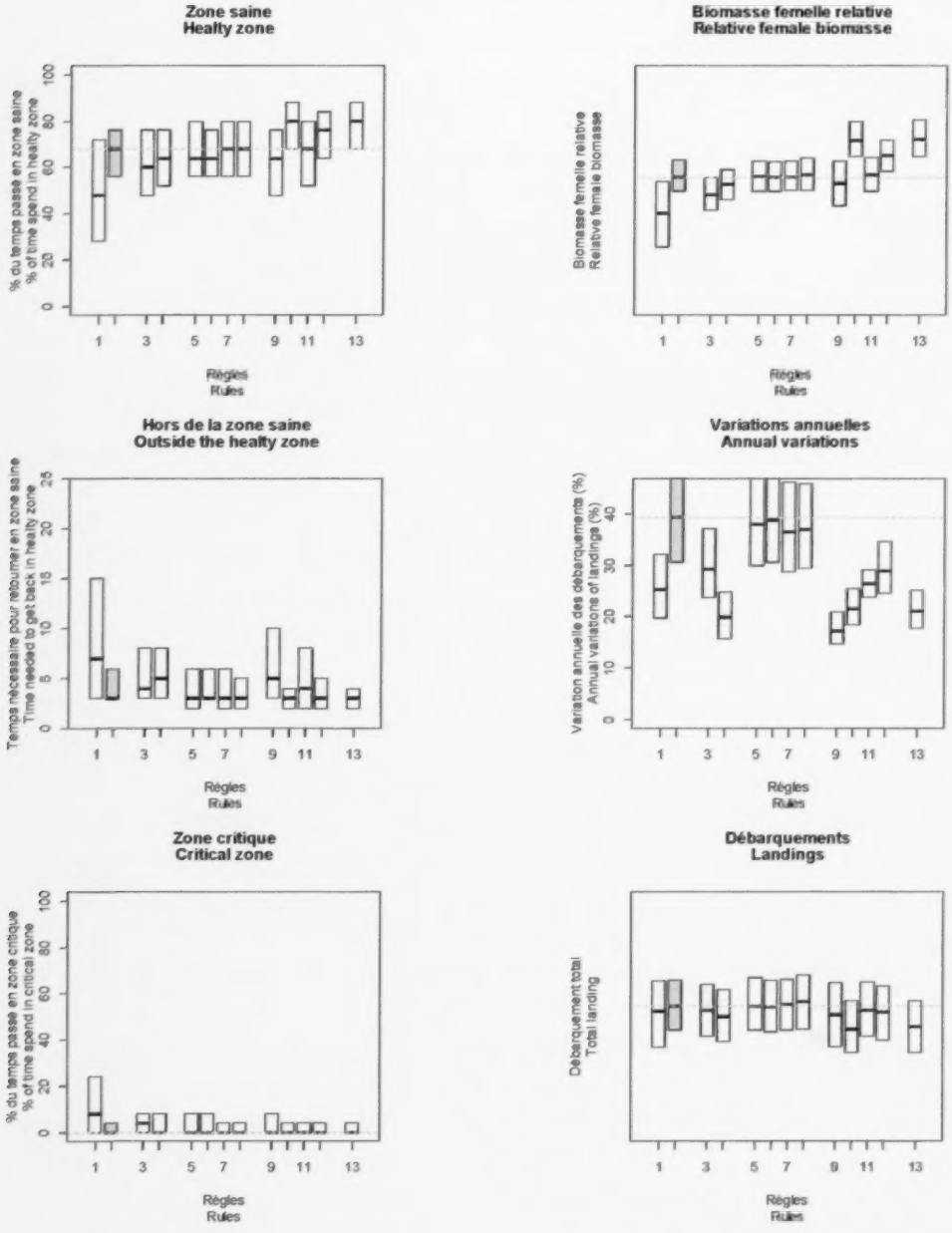
*Annexe 4. Indicateurs de performance des règles de décision du TAC simulées sous le scénario d'une relation stock-recrutement de type Saila-Lorda. La description des règles est présentée à l'Annexe 1.*

*Appendix 4. Indicators of the performance of the TAC decision rules simulated under the scenario of a Saila-Lorda stock-recruitment relationship. The description of the rules is presented in Appendix 1.*



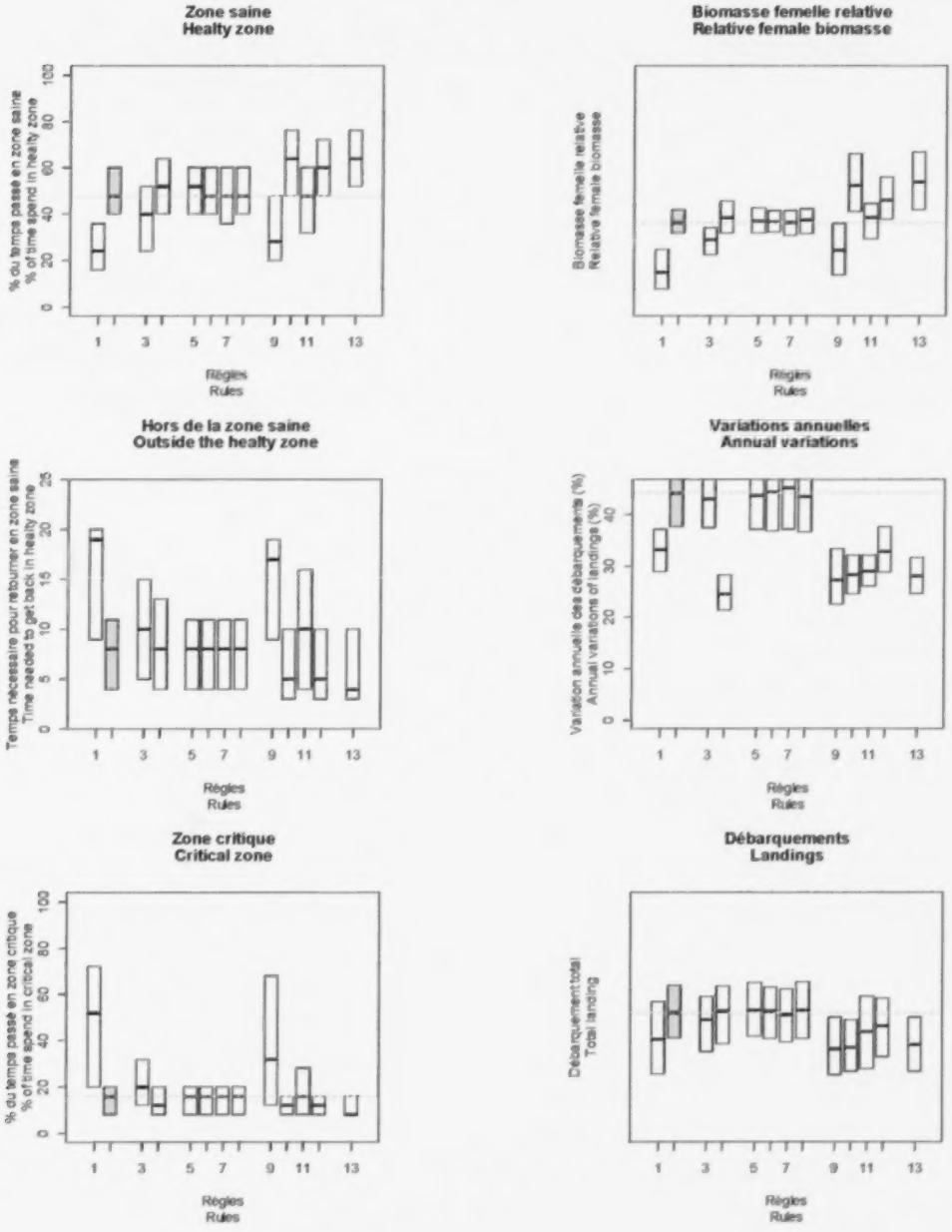
*Annexe 5. Indicateurs de performance des règles de décision du TAC simulées sous le scénario de changement de sexe hâtif. La description des règles est présentée à l'Annexe 1.*

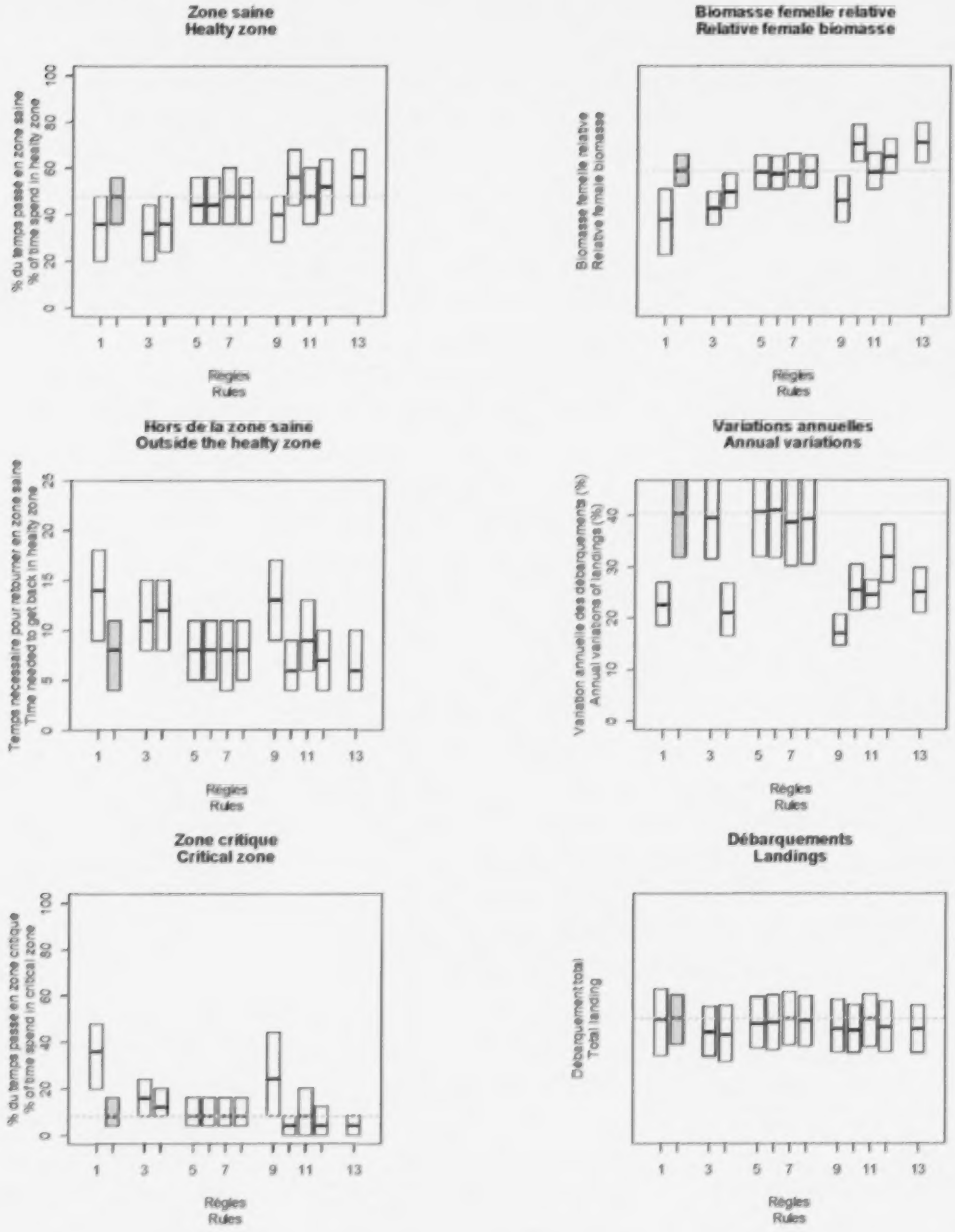
*Appendix 5. Indicators of the performance of the TAC decision rules simulated under the scenario of an early sex change. The description of the rules is presented in Appendix 1.*



*Annexe 6. Indicateurs de performance des règles de décision du TAC simulées sous le scénario d'un mauvais recrutement entre les années 25 et 27. La description des règles est présentée à l'Annexe 1.*

*Appendix 6. Indicators of the performance of the TAC decision rules simulated under the scenario of a bad recruitment between the years 25 and 27. The description of the rules is presented in Appendix 1.*



*Annexe 7. Indicateurs de performance des règles de décision du TAC simulées sous le scénario d'une augmentation graduelle de la mortalité naturelle. La description des règles est présentée à l'Annexe 1.*

*Appendix 7. Indicators of the performance of the TAC decision rules simulated under the scenario of a gradual increase of the natural mortality. The description of the rules is presented in Appendix 1.*